

UNIVERSITÉ DE NANCY

FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

POUR OBTENIR

le grade de Docteur ès-Sciences
Mention Sciences appliquées

PAR

François COLIN

Licencié ès sciences

1^{re} THÈSE: **Contribution à l'étude des phénomènes de floculation.**
Application au traitement des boues résiduaires.

2^e THÈSE: **Le dessalement de l'eau de mer.**

Soutenues le 3 octobre 1966
devant la Commission d'Examen

MM. J. AUBRY	Président
R. GIBERT	} Examineurs
A. HEROLD	
G. NOISETTE	
	Invité

NANCY
IMPRIMERIE GEORGES THOMAS
1966

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

POUR OBTENIR

**le grade de Docteur ès-Sciences
Mention Sciences appliquées**

PAR

François COLIN

Licencié ès sciences

**1^{re} THÈSE: Contribution à l'étude des phénomènes de floculation.
Application au traitement des boues résiduaires.**

2^e THÈSE: Le dessalement de l'eau de mer.

Soutenues le 3 octobre 1966
devant la Commission d'Examen

MM. J. AUBRY	Président
R. GIBERT	} Examineurs
A. HEROLD	
G. NOISETTE	Invité

NANCY
IMPRIMERIE GEORGES THOMAS
1966



Université de Nancy - Faculté des Sciences

Doyen: M. AUBRY

Assesseur: M. GAY

Doyens honoraires: MM. CORNUBERT, DELSARTE URION, ROUBAULT.

Professeurs honoraires:

MM. CROZE, RAYBAUD, LAFFITTE, LERAY, JULY, LAPORTE,
EICHHORN, GODEMENT, DUBREUIL, L. SCHWARTZ, DIEUDONNE,
de MALLEMANN, LONGCHAMBON, LETORT, DODE, GAUTHIER,
GOUDET, OLMER, CORNUBERT, CHAPELLE, GUERIN, WAHL.

Maîtres de conférences honoraires:

MM. LIENHART, PIERRET.

Professeurs:

MM. URION	Chimie biologique.
DELSARTE	Analyse supérieure.
ROUBAULT	Géologie.
CAPELLE	Mécanique rationnelle.
VEILLET	Biologie animale.
BARRIOL	Chimie théorique.
BIZETTE	Physique.
GUILLEN	Electronique.
GIBERT	Chimie physique.
LEGRAS	Mécanique rationnelle.
BOLFA	Minéralogie et cristallographie
NICLAUSE	Chimie.
FAIVRE	Physique appliquée.
AUBRY	Chimie minérale.
COPPENS	Radiogéologie.
DUVAL	Chimie.
FRUHLING	Physique.
HILLY	Géologie
LE GOFF	Génie chimique.
SUHNER	Physique expérimentale.
CHAPON	Chimie biologique.
HEROLD	Chimie minérale industrielle.
SCHWARTZ B.	Exploitation minière.
*MALAPRADE	Chimie.
MANGENOT	Botanique.
GAYET	Physiologie.
BONVALET	Mécanique appliquée.
HADNI	Physique.
*BASTICK	Chimie
DUCHAUFOR	Pédologie.
GARNIER	Agronomie.
*WEPPE	Minéralogie appliquée.
NEEL	Chimie organique industrielle.

* Professeur à titre personnel.

	BERNARD	Géologie appliquée.
	*CHAMPIER	Physique.
	*GAY	Chimie biologique.
	*REGNIER	Physico-chimie.
	STEPHAN	Zoologie.
	*CONDE	Zoologie.
	*WERNER	Botanique.
	EYMARD	Calcul différentiel et intégral.
	LEVISALLES	Chimie organique.
Mme	HERVE	Méthodes mathématiques de la physique.
	*GOSSE	Mécanique physique.
	FELDEN	Physique.

Maîtres de conférences:

Mme	BASTICK, Chimie M.P.C. (Epinal).	JANOT, Physique M.P.C. (Epinal).
MM.	GUDEFIN, Physique.	JACQUIN, Pédologie et chimie agricole.
	ROCCI, Géologie.	MAINARD, Physique M.G.P.
	VUILLAUME, Psychophysiologie.	CACHAN, Entomologie appliquée (E.N.S.A.).
	FRENTZ, Biologie animale.	MARTIN, Chimie M.P.C.
	HORN, Physique propédeutique.	N... Minéralogie.
	LAFON, Physique (I.S.I.N.).	N... Probabilités et statistiques.
	MARI Chimie (I.S.I.N.).	N... Mécanique (I.S.I.N.).
	AUROUZE, Géologie.	N... Mathématiques.
	DEVIOT, Physique du solide.	N... Mécanique expérimentale.
Mlle	FLECHON, Physique M.P.C.	N... Génie chimique.
	HUET, Mathématiques S.P.C.N.	N... Mathématiques M.P.C.
	VIGNES, Métallurgie.	N... Mathématiques S.P.C.N.
	BALESDENT, Thermodynamique chimique appliquée.	N... Mathématiques appliquées.
MM.	BLAZY, Minéralogie appliquée (E.N.S.G.).	N... Mécan. des fluides (I.S.I.N.).
		N... Physiologie animale.

Le présent travail a été effectué dans les laboratoires de l'INSTITUT DE RECHERCHES HYDROLOGIQUES DE NANCY, sous la direction de M. NOISETTE à qui nous exprimons notre profonde gratitude pour la bienveillance et pour l'intérêt qu'il nous a toujours porté.

Nous remercions vivement M. le Professeur HEROLD pour l'intérêt constant avec lequel il a suivi le déroulement de nos recherches, et dont les conseils et les remarques, ainsi que celles de M. le Professeur GIBERT que nous remercions également, nous ont conduit à modifier quelque peu la rédaction du présent travail.

Que M. le Professeur AUBRY, Doyen de la Faculté des Sciences, MM. les Professeurs GIBERT et HEROLD, M. NOISETTE soient remerciés d'avoir bien voulu faire partie de notre jury.

Nous ne saurions oublier l'ensemble du personnel de l'Institut de Recherches Hydrologiques et plus spécialement M. CROUZIER dont la collaboration efficace nous a permis de mener à bien notre travail de recherche.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INTRODUCTION

Quelle que soit leur origine, il est actuellement nécessaire d'effectuer un traitement des eaux résiduaires contenant des matières solides en suspension afin d'éviter la pollution du milieu récepteur. La législation actuelle (Décret n° 53-578 du 20-5-1953 - Instruction ministérielle du 6-6-1953) impose la prescription suivante au sujet du déversement des eaux résiduaires: leur teneur en matières en suspension ne doit pas dépasser une quantité variant de 30 à 100 mg/litre suivant le type de pollution du milieu récepteur. De plus, l'insuffisance des ressources en eau nécessite souvent une réutilisation ultérieure de l'eau traitée, dans le cas des industries grosses consommatrices. C'est ainsi qu'à titre d'exemple, si en sidérurgie l'on veut utiliser de l'eau fraîche extérieure à tous les stades de fabrication, il faut 300 à 400 m³ d'eau par tonne d'acier produite.

Les traitements entrepris aboutissent à la formation de déchets qui se présentent sous la forme de boues résiduaires. Ces boues contiennent généralement une importante quantité d'eau (80 à 98 %); aussi, il est souhaitable de leur faire subir un traitement de déshydratation afin de faciliter leur manutention en vue de leur élimination ou éventuellement de leur valorisation, en réduisant leur volume.

L'importance de ce problème très général est telle, que le Comité « Eau » de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, a retenu comme thème de recherche l'étude et le traitement des boues provenant

des installations d'épuration d'eaux résiduaires pour faciliter leur élimination et leur valorisation. Cette décision a donné lieu à une recherche financée par la D.G.R.S.T., dans le cadre de ses actions concertées du IV^e Plan, et exécutée sous contrat par l'INSTITUT DE RECHERCHES HYDROLOGIQUES DE NANCY.

Ces travaux de recherche nous ayant été confiés, leurs résultats font l'objet de notre sujet de thèse.

Nous nous sommes volontairement limités à l'étude de quatre types de boues résiduaires présentant une importance particulière :

Il s'agit :

des boues résiduaires de lavoir à charbon, de deux types de boues résiduaires provenant du lavage des gaz de hauts-fourneaux, différant entre elles par le régime de marche du haut-fourneau, suivant que celui-ci produisait des ferro-manganèse (boue n° 1) ou de la fonte Thomas (boue n° 2), des boues digérées de station d'épuration d'eaux urbaines, cette dernière boue se distinguant particulièrement des précédentes par sa forte teneur en matières organiques en suspension.

Une première partie de notre travail, constituée par l'étude des propriétés physiques et chimiques des boues étudiées, nous a permis de constater que ces boues contenaient une importante fraction de particules très fines, se déposant très lentement et possédant des propriétés voisines de celles de l'état colloïdal.

Cette constatation nous a conduit à étudier les phénomènes de floculation de ces boues, qui permettent de détruire l'état colloïdal. Pour cela, nous avons étudié plus particulièrement les propriétés électriques des particules en suspension, et l'action des flocculants sur ces propriétés et sur la stabilité des suspensions ; nous nous sommes limités aux polymères et polyélectrolytes organiques. Ces produits, relativement nouveaux et encore peu employés dans

le traitement des boues résiduaires, se révèlent beaucoup plus efficaces que les flocculants minéraux classiques, tout en présentant l'avantage de ne pas modifier les propriétés physico-chimiques du liquide de suspension (pH, teneur en sels dissous...). A notre connaissance, il n'y a pas encore eu d'étude systématique entreprise dans ce domaine; seule l'action des flocculants minéraux a été largement étudiée, surtout en ce qui concerne la floculation des argiles, problème important de l'alimentation en eau potable.

La troisième partie de notre travail est consacrée à l'application de ces traitements de floculation à la déshydratation des boues résiduaires étudiées. Nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure des traitements préliminaires de floculation étaient susceptibles d'améliorer les procédés classiques de déshydratation des boues: décantation, centrifugation, filtration sous vide et sous pression. Lorsque cela s'est révélé nécessaire, dans le cas de la centrifugation, nous avons réalisé cette étude pratique en utilisant une installation pilote comprenant une centrifugeuse de type semi-industriel.

L'ensemble des résultats ainsi obtenus nous a permis de déterminer pour chaque type de boue étudiée le traitement qui nous paraissait techniquement le plus intéressant.

CHAPITRE I

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES BOUES ETUDIEES

Avant d'entreprendre l'étude des traitements des boues résiduelles, il est nécessaire d'identifier avec précision les matériaux de base sur lesquels nous avons effectué notre étude, en déterminant les caractéristiques physiques et chimiques de ces boues et de leurs constituants. Ces caractéristiques varient avec les conditions d'exploitation des processus dont ces boues sont les résidus. Les valeurs figurant ci-dessous sont les moyennes des résultats obtenus sur plusieurs échantillons différents.

I. — Caractéristiques de la boue de lavoir à charbon

A. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA BOUE

Masse volumique, mesurée au picnomètre: $1,050 \text{ g/cm}^3$.

Viscosité dynamique (mesurée à l'aide d'un viscosimètre
BROOKFIELD LVO, vitesse de la broche: 60 t/mn):
56 cp.

Volume de matières décantables en deux heures: $247 \text{ cm}^3/\text{litre}$.

Total des matières en suspension: $25,9 \text{ g/litre}$.

B. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DU LIQUIDE DE SUSPENSION

pH: 8,40.

Résistivité à 20° C (mesurée à 1 000 Hz à l'aide d'un pont d'impédances METRIX 626 B équipé d'une cellule PHILIPS PR 9 510): 1 180 ohms.cm.

C. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DES PARTICULES EN SUSPENSION

a) *Densité moyenne* : 2,203.

b) *Répartition granulométrique* :

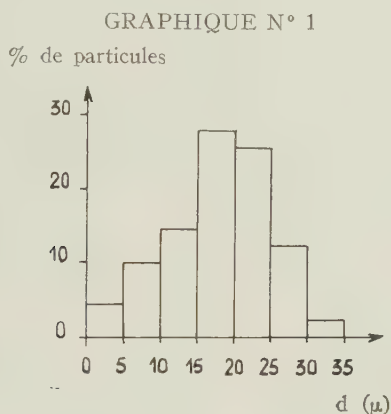
La répartition granulométrique des particules de taille supérieure à 35 microns est déterminée par tamisage en voie humide, à l'aide de tamis normalisés.

d représentant la plus grande dimension de chacune des particules, nous avons la répartition en poids suivante:

1 mm	< d	0,43 %
500 microns	< d < 1 mm	0,55 %
200 microns	< d < 500 microns	4,98 %
100 microns	< d < 200 microns	7,11 %
50 microns	< d < 100 microns	7,64 %
35 microns	< d < 50 microns	28,13 %
0	< d < 35 microns	51,52 %

La plupart des particules ont donc une taille inférieure à 35 microns. Or, ce sont généralement les boues contenant des particules fines qui sont les plus difficiles à traiter, ces particules ayant un comportement semblable à celui des colloïdes. Il nous a paru intéressant de connaître la répartition granulométrique des particules de taille inférieure à 35 microns. Nous l'avons déterminée à l'aide d'une balance F. Martin. Celle-ci enregistre la courbe de sédimentation de la fraction de la boue passant à travers

un tamis de 35 microns, préalablement diluée. Connaissant la densité des particules, et ayant admis qu'en suspension diluée elles décantent conformément à la loi de Stokes, nous avons déterminé à partir de la courbe enregistrée

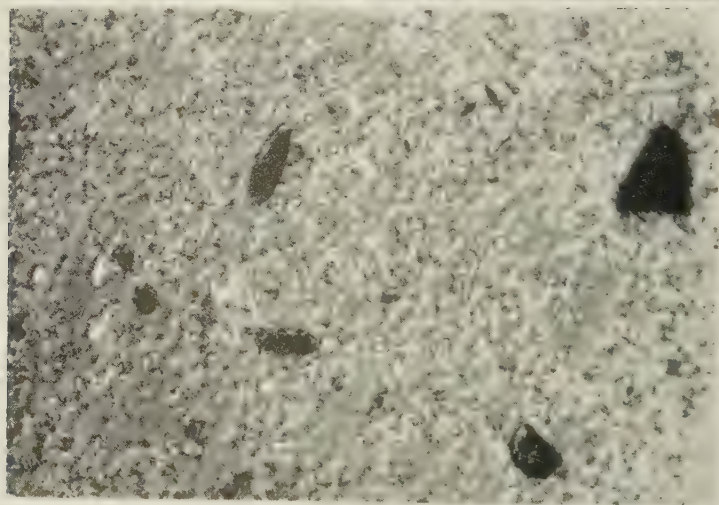
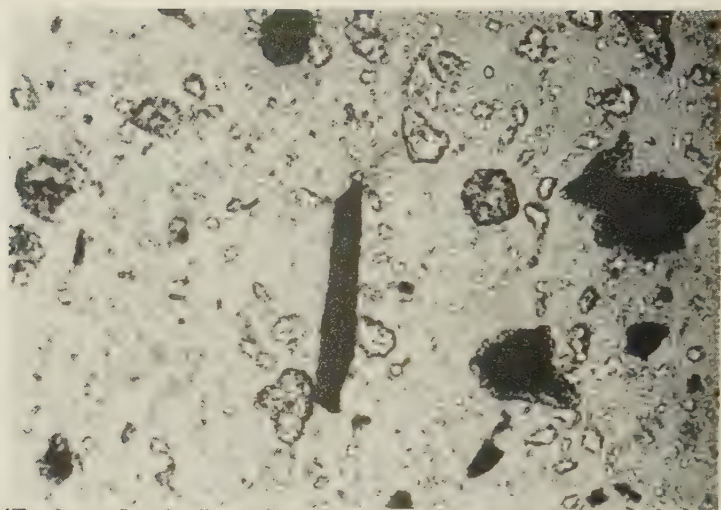


la répartition granulométrique représentée par l'histogramme figurant ci-dessus (graphique n° 1). d représente ici le diamètre d'une particule sphérique ayant la même densité que la particule étudiée et décantant à la même vitesse.

Plusieurs essais effectués sur le même échantillon avec différentes vitesses de rotation du tambour de la balance nous ont donné une reproductibilité satisfaisante.

c) *Examen microscopique :*

Nous avons pratiqué cet examen pour nous faire une idée de la forme et de la nature des particules en suspension. Nous avons effectué successivement l'examen ordinaire en lumière transmise, l'examen en lumière polarisée pour déceler les particules possédant un pouvoir rotatoire, et en contraste de phase pour l'examen des particules les plus petites, pratiquement transparentes. Un appareil photographique monté sur le microscope Nachet 300 utilisé nous a permis d'obtenir les photos suivantes :



2

PHOTO n° 1

Observation normale des particules de taille inférieure à 50 microns. Grossissement 470 fois.

Nous distinguons particulièrement trois types de particules:
 de grosses particules noires de charbon ou de schiste, anguleuses,
 de grosses particules transparentes: quartz, mica,
 des particules transparentes beaucoup plus petites, de nature argileuse.

PHOTO n° 2

Particules de taille inférieure à 35 microns. Grossissement 470 fois. L'observation en contraste de phase permet de distinguer les petites particules argileuses. L'étude des propriétés électriques de ces particules sera effectuée au chapitre III.

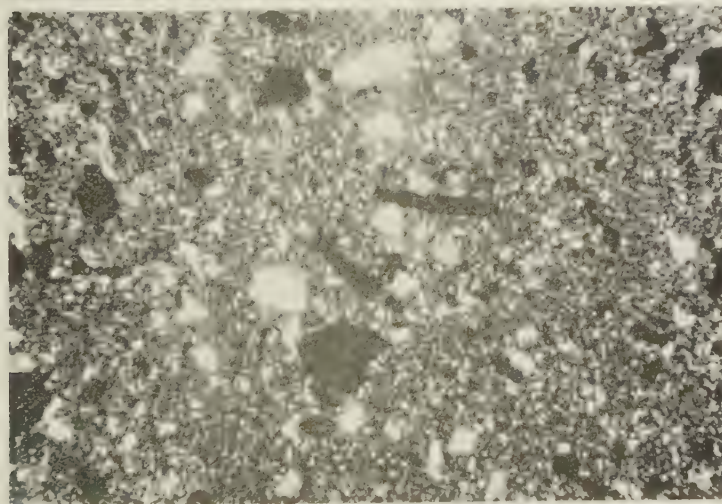
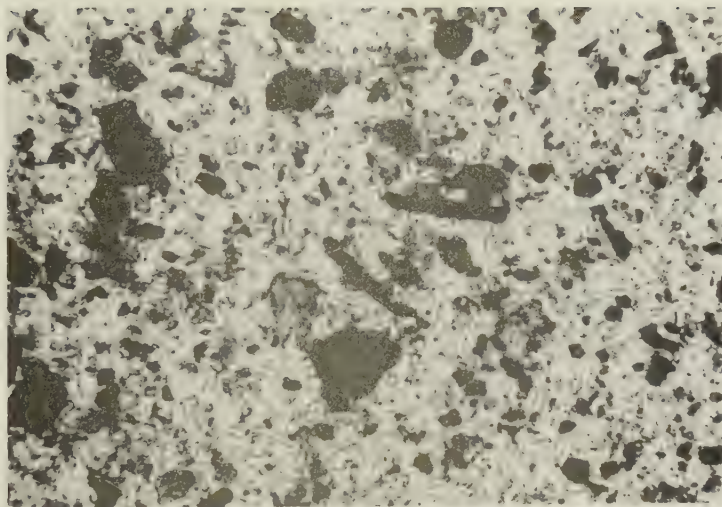


PHOTO n° 3

Observation normale des particules dont les tailles sont comprises entre 35 et 50 microns. Grossissement 300 fois.

Nous observons ici les deux types de particules : opaques et transparentes. Afin de déterminer la nature des particules transparentes, nous avons pris la photo du même sujet entre polariseur et analyseur croisés.

PHOTO n° 4

Les particules douées de pouvoir rotatoire apparaissent ici très brillantes sur fond noir. La comparaison des photos n° 3 et n° 4 nous montre que toutes les particules transparentes ne sont pas douées de pouvoir rotatoire. Les particules brillantes sont essentiellement du quartz dont les propriétés abrasives sont bien connues.

D. — ANALYSE DU LIQUIDE DE SUSPENSION

Avant d'énoncer les résultats obtenus, il nous paraît utile de rappeler brièvement les méthodes analytiques utilisées. Il s'agit de méthodes couramment utilisées pour l'analyse des eaux, et dont la majorité sont normalisées.

Bicarbonates HCO_3^- : titrage acidimétrique par addition de HCl $\text{N}/10$ jusqu'au point de virage du méthylorange qui passe de la couleur jaune à la couleur pelure d'oignon ($\text{pH} = 4,3$).

Sulfates SO_4^{--} : dosage gravimétrique effectué conformément aux prescriptions de la norme N.F. T. 90-009. Précipitation de Ba SO_4 par addition de BaCl_2 en milieu acide.

Chlorures Cl^- : précipitation de AgCl_2 par une solution de AgNO_3 en présence de chromate neutre de K, jusqu'à la formation d'une tache persistante de chromate d'argent (méthode de MOHR).

Sodium et potassium : ces ions sont dosés par spectrophotométrie de flamme, avec un spectrophotomètre PERKIN-ELMER modèle 52 c, le sodium émettant un rayonnement qui présente un doublet à 589 et le potassium un doublet à 768 $\text{m}\mu$.

Calcium et magnésium : dosage par complexométrie, conformément à la norme N.F. T. 90-003. On ajoute un indicateur donnant avec l'ion à déterminer un complexe coloré caractéristique. Le titrage se fait à l'aide d'un composé capable de former un chélate avec l'ion métallique. Au point terminal du dosage, l'indicateur privé de métal change de couleur,

La dureté totale du liquide analysé (somme $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$) est déterminée en utilisant comme réactif le complexon III (sel disodique de l'acide éthylène-diaminotétracétique) et comme indicateur le noir ériochrome T (colorant O-O' dioxyazoïque), à $\text{pH} = 11$. La détermination de Ca^{++} s'effectue en utilisant le même réactif, à $\text{pH} = 13$, et comme indicateur l'acide 2-hydroxy-1-(2-hydroxy-4-sulfo-1-naphtyl-azo)-3-naphtoïque. Par différence avec la dureté totale, nous obtenons la concentration en Mg^{++} .

Résultats.

ANIONS:

	mg/litre	milli-équivalents
	—	—
Bicarbonates HCO_3^-	220	3,60
Sulfates SO_4^{--}	119	2,48
Chlorures Cl^-	134	3,78

CATIONS:

Calcium Ca^{++}	60	3,00
Magnésium Mg^{++}	28	2,30
Sodium Na^+	80	3,48
Potassium K^+	18	0,46

E. — ANALYSE CHIMIQUE

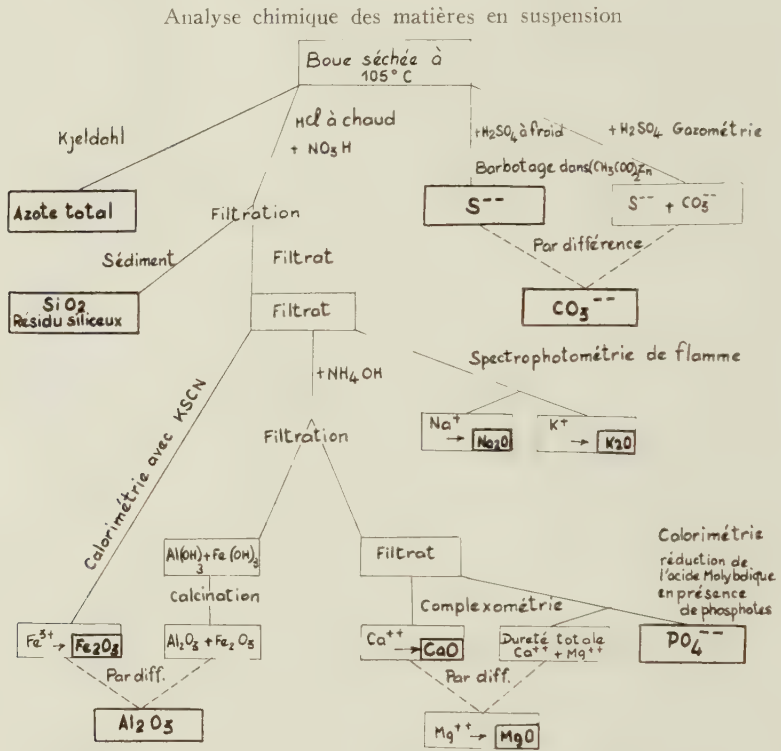
DES PARTICULES EN SUSPENSION

(effectuée sur les matières solides de la boue,
séchées à 105°C)

L'ensemble des opérations effectuées est schématisé dans le tableau ci-dessous.

Pour exprimer les résultats, nous nous sommes conformés à l'usage industriel qui consiste à séparer la silice,

l'alumine et les autres oxydes métalliques, bien qu'une telle représentation soit purement fictive.



Résultats.

Eau de constitution	23,44 %
(eau éliminée par chauffage de 105 à 250°C)	
Matières combustibles et volatiles	38,61 %
Silice SiO_2	22,90 %
Oxyde ferrique Fe_2O_3	1,52 %
Alumine Al_2O_3	9,32 %
Chaux CaO	0,23 %
Magnésie MgO	0,29 %
Potasse K_2O	1,72 %
Soude Na_2O	0,08 %
	98,11 %

II. — Caractéristiques des eaux de lavage de gaz de hauts-fourneaux n° 1

A. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA SUSPENSION

Aspect: couleur noire.

Masse volumique: sensiblement égale à $1,000 \text{ g/cm}^3$.

Viscosité: égale à celle de l'eau prise à même température.

Matières décantables en 2 heures: volume négligeable.

Total des matières en suspension: $0,279 \text{ g/litre}$.

B. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU LIQUIDE DE SUSPENSION

$\text{pH} = 9,7$.

Résistivité à $20^\circ \text{C} = 484 \text{ ohms.cm}$.

C. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION

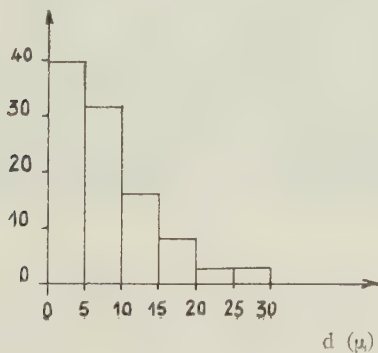
a) *Masse volumique moyenne*: $3,010 \text{ g/cm}^3$.

b) *Répartition granulométrique*:

Toutes les particules de la suspension traversent un tamis normalisé de 35 microns. La répartition granulomé-

GRAPHIQUE N° 2

% de particules



trique a été effectuée avec la balance granulométrique F. Martin.

0 < d < 5	39,50 %
5 < d < 10	31,60 %
10 < d < 15	15,80 %
15 < d < 20	7,90 %
20 < d < 30	2,60 %
30 < d < 35	2,60 %
35 < d	0 %

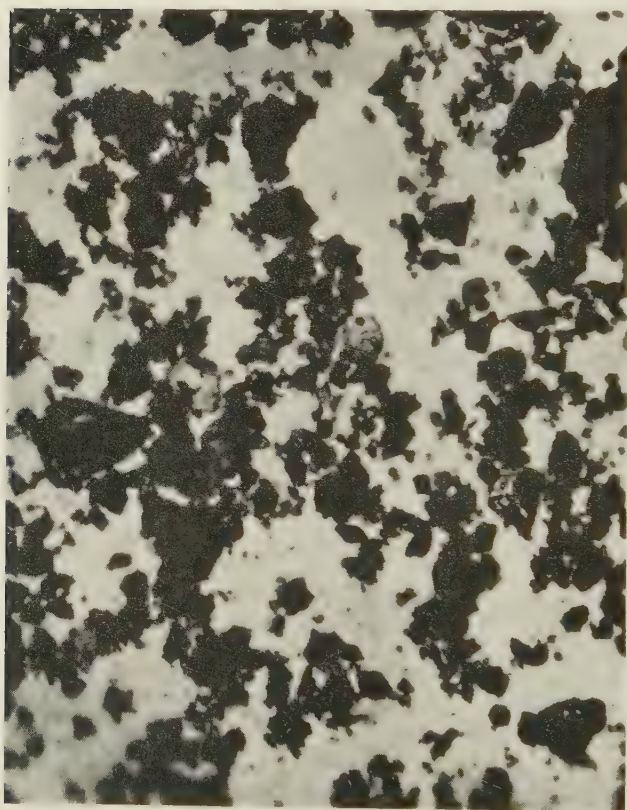


PHOTO n° 5

Grossissement 520 fois.

Cette photographie nous permet d'identifier des particules sombres d'oxyde de fer, et des particules transparentes de laitier vitrifié à haute température,

D. — ANALYSE CHIMIQUE
DU LIQUIDE DE SUSPENSION

ANIONS:

	mg/litre	milli-équivalents
Bicarbonates HCO_3^-	262	4,3
Carbonates CO_3^{--}	102	3,4
Sulfate SO_4^{--}	32	0,67
Chlorures Cl^-	193	5,45
		13,82

CATIONS:

Calcium Ca^{++}	20	1,0
Magnésium Mg^{++}	9,7	0,8
Sodium Na^+	72	3,14
Potassium K^+	335	8,60
		13,54

E. — ANALYSE CHIMIQUE
DES PARTICULES EN SUSPENSION

Eau de constitution	2	%
Perte au feu à 900°	30	%
Résidu inattaquable	9	%
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	44	%
Carbonates CO_3^{--}	10,8	%
Calcium Ca	2	%
Potassium K	0,2	%
Sodium Na	0,0	%

III. — Caractéristiques de l'eau de lavage de gaz
de hauts-fourneaux n° 2

A. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA SUSPENSION

Aspect: couleur brune. Température: 30° C.

Masse volumique: $1,002 \text{ g/cm}^3$.

Matières décantables en 2 heures: $2,1 \text{ cm}^3/\text{litre}$.

Total des matières en suspension: $0,845 \text{ mg/litre}$.

B. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DU LIQUIDE DE SUSPENSION

pH = 7,60.

Résistivité à 20° C = 2 690 ohms.cm.

C. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DES PARTICULES EN SUSPENSION

a) *Masse volumique moyenne*: 2,125 g/cm³.

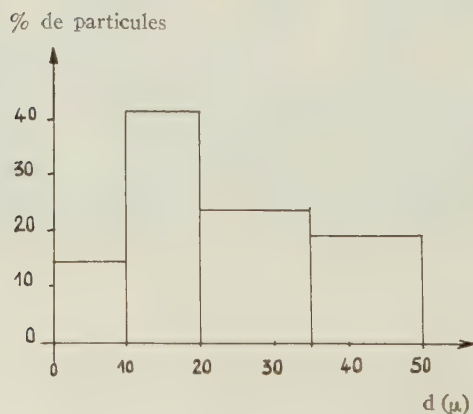
b) *Répartition granulométrique*: déterminée par tamisage en voie humide (Dimensions exprimées en microns):

200 < d <	0 %
100 < d < 200	0,4 %
50 < d < 100	5,1 %
0 < d < 50	94,5 %

La répartition granulométrique inférieure à 50 microns a été déterminée à l'aide de la balance F. Martin.

35 < d < 50	19,3 %
20 < d < 35	23,9 %
10 < d < 20	42,1 %
0 < d < 10	14,7 %

GRAPHIQUE N° 3



La plupart des particules ont une taille entre 10 et 35 microns. La faible amplitude de la courbe de sédimentation enregistrée ne nous a pas permis de définir la répartition granulométrique avec davantage de précision.

D. — ANALYSE CHIMIQUE DU LIQUIDE DE SUSPENSION

Dureté totale: 13 degrés français.

ANIONS:

	mg/litre	milli-équivalents
	—	—
Bicarbonates HCO_3^-	240	3,95
Sulfates SO_4^{--}	14	0,29
Chlorures Cl^-	28	0,79
Cyanures CN^-	4	0,16

Dosage des cyanures: le pH de la solution étant ajusté à 11, on titre les ions CN^- par une solution de AgNO_3 pour former un complexe soluble $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$. Dès qu'un excès de Ag^+ est ajouté, il est détecté par un indicateur coloré, la paradiméthylbenzylidènerhodamine qui passe du jaune au rose saumon (Standard Methods for the examination of water and wastewater, 11^e édition, p. 355).

CATIONS:

Calcium Ca^{++}	52	2,60
Sodium Na^+	8	0,35
Potassium K^+	17	0,44
Ammonium NH_4^+	48	2,67

(Déterminé par dosage colorimétrique à l'aide du Réactif de Nessler: ce réactif est le mercuriodure de K qui donne une coloration d'iodure de mercuri-ammonium orangé, avec de la soude en excès (Norme NF. T.90-015).

E. — ANALYSE CHIMIQUE
DES PARTICULES EN SUSPENSION

Eau de constitution	2,45 %
Perte au feu	7,10 %
Silice SiO_2	10,90 %
Magnésie MgO	12,00 %
Oxyde de Na, Na_2O	0,15 %
Oxyde de K, K_2O	1,00 %
Oxyde de fer, Fe_2O_3	22 %
Albumine Al_2O_3	28,10 %
Carbonates CO_3 —	16 %
Sulfures S—	0,13 %
	99,83 %

IV. — Caractéristiques des boues de stations d'épuration

Les boues digérées de stations d'épuration sont obtenues par dégradation biologique en milieu anaérobie de boues ayant préalablement subi une oxydation biologique en bassin ou sur un lit bactérien. Ce traitement est destiné à détruire les matières organiques et à les éliminer sous forme de méthane, de gaz carbonique, d'hydrogène, d'ammoniac et de sels minéraux.

PHOTO n° 6

En haut:

Eau de lavage de gaz de hauts fourneaux n° 2

Grossissement 130 fois.

Les mêmes remarques s'imposent que pour la photo n° 5.

PHOTO n° 7

Au milieu:

Boue digérée, grossissement 130 fois. On distingue nettement les différents types de particules:

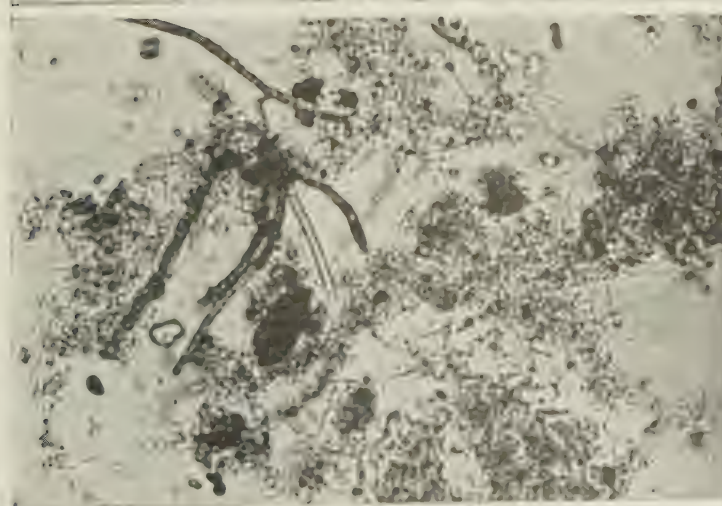
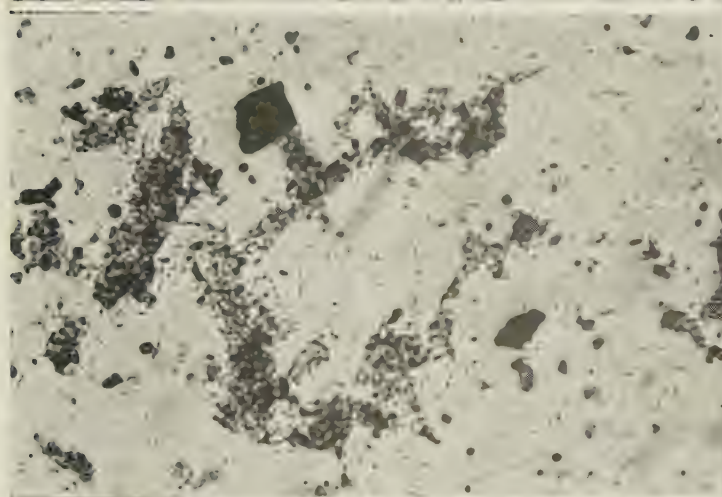
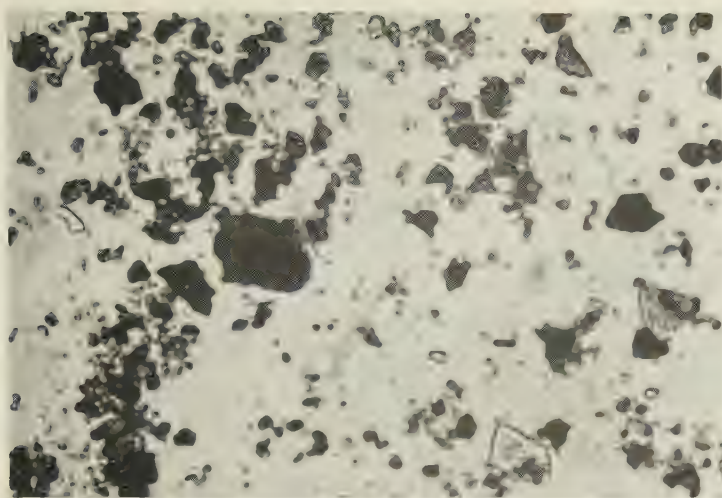
— Particules de nature minérale aux contours bien nets, de natures très diverses.

— Particules de matière organique de formes floconneuses, qu'il est très difficile d'individualiser.

PHOTO n° 8

En bas:

Même sujet, grossissement 470 fois. On retrouve ici les deux types de particules citées précédemment, et on remarque de plus en plus la présence de fibres.



A. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE CES BOUES

Couleur noire, et aspect visqueux, dégageant peu d'odeur lorsque la digestion est correctement effectuée.

Masse volumique: 1,110 g/cm³.

Viscosité dynamique: 510 cp.

Total des matières en suspension: 58,5 g/litre.

Humidité: 94,1 % en poids.

Ces boues ne décantent pas statiquement, même après plusieurs jours de repos.

B. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU LIQUIDE DE SUSPENSION

pH = 7,0.

Résistivité à 20° = 317 ohms.cm.

C. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION

La détermination de la répartition granulométrique n'est pas possible car l'on a affaire à une majorité de particules de matière organique, de forme indéfinie (flocons). De plus, cette boue contient de nombreuses fibres. Cela est mis en évidence par l'examen microscopique (voir les photos de la page 19).

D. — ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE DES MATIÈRES EN SUSPENSION

Perte au feu à 900°	49,4	%
(matières combustibles et volatiles).		
Résidu inattaquable (silice)	36,2	%
Fer Fe	4,5	%
Carbonate de Ca	6	%
Azote total N	2,0	%
Sulfures S [—]	1,4	%
Phosphates PO ₄ [—]	0,06	%
	99,56	%

CHAPITRE II

PHENOMENES DE FLOCCULATION ET POTENTIEL ELECTROKINETIQUE

Le processus élémentaire des phénomènes de floculation est constitué par le choc de deux particules, d'une particule et d'un flocon, ou de deux flocons, suivi d'une adhésion de ces particules ou flocons, conduisant à la formation d'un flocon de taille plus importante. La condition nécessaire pour que ce processus élémentaire ait lieu, est donc l'existence d'une collision suivie d'une adhésion. Il en résulte que la probabilité P qu'ont deux particules de se réunir pour former un doublet, est égale au produit de la probabilité de collision W par la probabilité d'adhésion A :

$$P = W \cdot A.$$

L'existence de forces d'attraction entre les particules détermine, autour de chacune d'elles, une sphère d'attraction ayant un rayon R égal à la distance maximum à laquelle une autre particule viendra adhérer à la première, en l'absence de toute force de répulsion. Nous dirons qu'il se produit une collision entre deux particules lorsque le centre de gravité de l'une pénètre dans la sphère d'attraction de l'autre. La probabilité W sera donc liée à R , donc aux forces d'attraction interparticulaires.

L'adhésion entre deux particules se réalisant lorsque les deux particules ont une énergie cinétique supérieure à l'énergie nécessaire pour vaincre les forces de répulsion, A sera liée aux forces de répulsion.

L'étude des phénomènes de floculation nécessite donc la connaissance de l'ensemble des forces s'établissant entre deux particules en suspension.

Nous distinguons d'une part les forces d'attraction:

Forces de LONDON - van der WAALS à courte portée (inversement proportionnelles à la puissance 7 de la distance).

Forces de cohésion dues aux phénomènes de tension superficielle.

Eventuellement d'autres forces d'origine mécanique (formation de « ponts » matériels entre particules par adsorption d'une chaîne macromoléculaire sur deux ou plusieurs particules).

L'ensemble de ces forces d'attraction détermine donc R, et par conséquent W. Dans sa théorie cinétique de la floculation, SMOLUCHOWSKI (1) a montré que $W = 4 \pi D R$ pour deux particules de même diamètre; R étant le rayon de leurs sphères d'attraction, et D un coefficient de diffusion qui caractérise la vitesse de la particule dans la suspension. Dans le cas où les deux particules sont de tailles différentes, MULLER a montré que

$$W = 2 \pi R (D_1 + D_2),$$

D_1 et D_2 étant les coefficients de diffusion de chaque particule, et R le rayon d'action mutuel.

Nous aurons donc, dans le cas le plus général:

$$P = 2 \pi R (D_1 + D_2) A,$$

A étant une fonction des forces de répulsion entre les particules. Ces forces sont essentiellement de nature électrostatique.

En 1892, LINDER et PICTON (2) observèrent au microscope que les particules colloïdales se déplacent sous l'action d'un champ électrique, ce qui prouve qu'elles portent une charge électrique; dans la majorité des cas, celle-ci est négative. Elle est due:

- soit à l'adsorption préférentielle, sur la paroi d'ions négatifs, par suite de leur plus forte polarisabilité et de leur plus petite taille, en particulier d'ions OH^- en milieu aqueux,
- soit à l'ionisation de groupements chimiques des molécules constituant le matériau de la paroi,
- soit aux ions provenant d'une réaction chimique entre le solide et le liquide.

L'interprétation théorique des effets électrocinétiques, en particulier de l'électrophorèse, a conduit de nombreux investigateurs à émettre l'hypothèse de l'existence d'une double couche ionique à l'interface solide-liquide, puis à attribuer une structure définie à cette double couche.

Ce sont les travaux de HELMHOLTZ (3) qui ont donné naissance à cette notion de double couche. Si l'on considère une particule solide plongée dans une solution aqueuse d'électrolyte, sa surface portera une certaine densité de charge par suite des raisons énoncées précédemment. Comme l'ensemble du système est électriquement neutre, il est nécessaire que la charge superficielle soit neutralisée par une charge électrique de signe opposé, répartie dans la phase liquide. Par suite de l'attraction électrostatique, les ions opposés vont tendre à se concentrer à proximité de la surface du solide, tandis que les ions de même signe seront repoussés. Si un tel modèle était conforme à la réalité, la chute de potentiel à travers la double couche serait brutale.

GOUY (4) et CHAPMAN (5) ont réalisé une étude théorique de la structure de la double couche, exprimant la distribution des ions en fonction de la composition de la phase aqueuse, en tenant compte de l'agitation thermique. En

effet, les cations présents dans le liquide de suspension sont attirés électrostatiquement par les anions adsorbés aux parois, mais d'autre part, ils ont tendance à être dispersés par l'agitation thermique. A une température donnée, il existe donc un état d'équilibre dans lequel la distribution des cations autour de la particule est exprimée par la fonction de BOLTZMANN. Cette analyse théorique de la double couche est fondée sur plusieurs hypothèses, en particulier celle qui admet que les ions qui forment la couche diffuse peuvent être considérés comme des charges ponctuelles. Lors de l'étude des effets électrocinétiques, une telle hypothèse conduit à une densité de charge superficielle beaucoup trop élevée.

STERN (6) a mis au point une théorie tenant compte de cette difficulté. Dans le modèle qu'il propose, les ions opposés sont répartis entre une couche diffuse de charges ponctuelles et une couche superficielle immobile, d'épaisseur bien définie. Signalons enfin qu'une extension du modèle de STERN a été proposée par GRAHAME (7).

A l'heure actuelle, une étude rigoureusement quantitative des effets électrocinétiques présente de nombreuses difficultés encore insurmontées. Cependant, le modèle de GOUY-CHAPMAN nous permet d'expliquer les phénomènes d'électrophorèse. Nous supposons qu'une partie de la double couche adhère à la paroi, tandis que l'autre est mobile sous l'action d'un champ électrique (couche diffuse de GOUY).

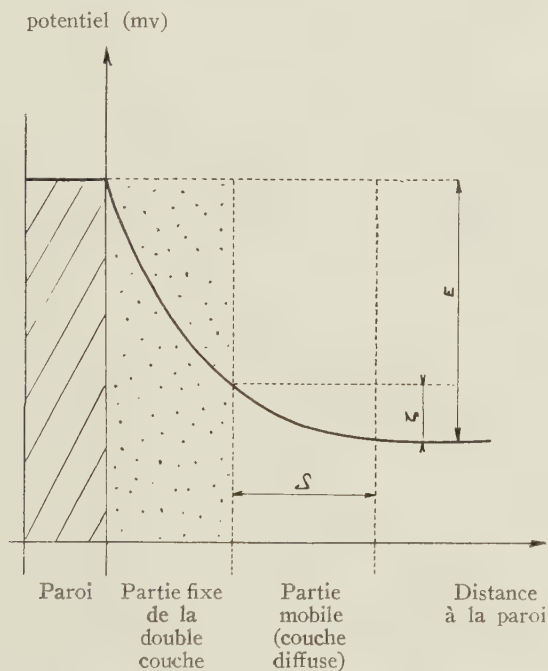
Le graphique donnant le potentiel électrique en fonction de la distance à la paroi a l'allure ci-contre.

On appelle potentiel ζ la différence de potentiel entre la surface qui sépare la couche fixe de la couche diffuse, et le sein du liquide. ζ est appelé potentiel électrocinétique par opposition au potentiel thermodynamique E , qu'on peut calculer par la formule de NERNST, et qui est la différence de potentiel totale entre la paroi et le sein du liquide.

ζ dépend à la fois de E et de l'épaisseur de la couche diffuse.

Du point de vue électrique, la double couche est analogue à un condensateur dont les plateaux situés à la distance δ et séparés par un milieu de constante diélectrique D égale à celle du liquide, sont portés à une différence de potentiel égale à ζ . La valeur de ζ est donc une mesure

GRAPHIQUE N° 4



de la charge électrique portée par l'unité de surface du système formé par la particule et la partie fixe de la double couche. Elle détermine donc la grandeur des forces électrostatiques de répulsion entre particules, donc la probabilité d'adhésion A entre particules.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'ACTION DES POLYMERES ORGANIQUES SUR LE POTENTIEL ζ DES PARTICULES EN SUSPENSION

Il est bien connu que les électrolytes en solution exercent une action flocculante, et que celle-ci est déterminée par la valence de l'ion qui porte une charge opposée à celle de la particule, la flocculation se faisant d'autant mieux que cette valence est élevée [travaux de SCHULZE (8) et HARDY (9)]. Cependant, l'utilisation de sels minéraux tels que le sulfate d'alumine ou le chlorure ferrique, présente le gros inconvénient de modifier les caractéristiques physico-chimiques du liquide de suspension (pH, conductivité...), ce qui est défavorable à une réutilisation de l'eau. C'est pourquoi nous avons orienté notre étude vers l'utilisation de polymères organiques ne présentant pas cet inconvénient.

I. — Méthode de mesure et appareillage utilisé

Le potentiel ζ des particules étant une mesure de leur charge par unité de surface, nous avons utilisé une méthode dont le principe est la mesure de la mobilité des particules soumises à un champ électrique.

Lorsqu'une particule est soumise à un champ électrique, elle atteint presque instantanément une vitesse limite telle

qu'il y ait équilibre entre la force électrique d'attraction et la force de friction due à la viscosité du milieu. Le calcul conduit à la relation suivante entre ζ et la mobilité u de la particule:

$$\zeta = \frac{k \cdot \eta \cdot u}{D'} \dots\dots\dots (1)$$

η = viscosité du liquide de suspension,

D' = constante diélectrique du liquide de suspension.

Le facteur k dépend des valeurs relatives du diamètre de la particule et de l'épaisseur de la double couche ionique.

Dans le cas où l'on a affaire à une particule relativement grosse et non conductrice, l'épaisseur de la double couche ionique est très inférieure au rayon de courbure de la particule, le système électrique est assimilable à un condensateur plan à plaques parallèles, et $k = 4 \pi$,

d'où:

$$\zeta = 4 \pi \frac{\eta}{D'} \cdot u \quad (2), \text{ formule de } \text{HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI.}$$

Dans le cas d'une petite particule présentant une symétrie grossièrement sphérique et se trouvant dans un milieu de force ionique élevée, l'épaisseur de la double couche est supérieure au rayon de courbure de la particule, et le système est assimilable à un condensateur sphérique. Alors $k = 6 \pi$ et

$$\zeta = 6 \pi \frac{\eta}{D'} \cdot u \quad (3) \text{ formule de HUCKEL.}$$

Si la particule est petite, non sphérique et dans un milieu de force ionique élevée, la mobilité de la particule dépend de sa forme et de son orientation.

L'appareil utilisé pour ces mesures est appelé Zéta-mètre (ZETA-METER Inc., New-York). Il se compose de: une alimentation en courant continu, de tension stabilisée réglable de 0 à 300 volts, avec inverseur de polarité, et

munie d'un voltmètre et d'un microampèremètre de précision. Cet appareil comporte une prise à tension variable pour l'éclairement du microscope.

une cellule d'électrophorèse en plexiglas avec deux types d'électrodes en platine iridié ou en molybdène. Le tube de la cellule étant éclairé par un faisceau lumineux réfléchi sur un bloc de verre formant support de cellule, le système optique du microscope ne reçoit ainsi aucune lumière directe.

un illuminateur produisant un mince faisceau de lumière blanche intense, pour éclairer les particules.

un microscope stéréoscopique spécial comportant trois objectifs doubles, et des oculaires micrométriques permettant de mesurer la vitesse de déplacement des particules.

une minuterie électrique avec contacteur à action rapide, mesurant les dixièmes de seconde.

Cet appareillage permet d'observer des particules ayant des tailles comprises entre 0,1 et 10 microns, en suspension dans un liquide ayant une résistivité supérieure à 700 ohms.cm à 20° C., pour éviter tout effet d'électrolyse dans la cellule.

D'après BRINTON et LAUFFER (10), ces conditions correspondent au domaine de validité de la formule de HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI.

Cette formule, dans laquelle on exprime les différentes grandeurs dans les unités couramment employées, devient :

$$\xi = \frac{113\,000 \, \eta}{D^2} \cdot u, \quad \dots\dots\dots (4)$$

η étant la viscosité à la température de la mesure, exprimée en poises, et u , la mobilité de la particule exprimée en microns/seconde par volt/cm. ξ est alors exprimé en mV.

La relation (4) nous montre que toutes les particules possédant un potentiel électrocinétique identique auront la même mobilité, quels que soient leurs rayons.

Les effets d'électroosmose au voisinage de la paroi du tube de la cellule imposent au liquide un mouvement par rapport à la cellule. Comme la cellule est fermée, un flux égal de liquide s'écoule en sens inverse, au centre du tube. Les mesures de vitesse des particules seront effectuées

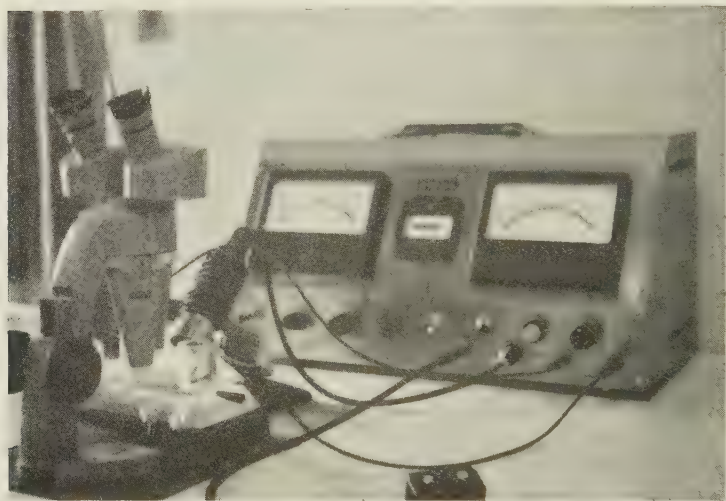


PHOTO n° 9.

dans le plan horizontal passant par le milieu du tube de la cellule, à 14,7 % du bord du tube, le liquide étant au repos par rapport à la cellule le long de la ligne ainsi définie.

II. — Résultats expérimentaux

1. PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION

Avant toute étude ultérieure, il est nécessaire de dresser une « carte d'identité » des particules de chaque type de

boue étudié, du point de vue de leurs propriétés électriques, comme nous l'avons fait au Chapitre I du point de vue de leurs autres propriétés physiques et chimiques.

Dans ce but, nous avons étudié la répartition des particules en suspension en fonction de leur potentiel ζ , afin de déterminer si l'étude de ces répartitions permettait de mettre en évidence des propriétés spécifiques à chaque type de boue.

Mode opératoire:

Pour chacun des quatre types de boues à étudier, nous avons mesuré la mobilité de 100 particules dans un champ électrique. Plusieurs essais successifs nous ont montré qu'une différence de potentiel de 100 volts aux bornes de notre cellule, correspondant à un gradient de potentiel de 10 V/cm, donnait aux particules une vitesse que notre appareillage permettait de mesurer dans les meilleures conditions, cette vitesse étant telle qu'il y ait peu de perturbations dues aux phénomènes de convection thermique dans la cellule, et la différence de potentiel appliquée, telle qu'aucun dégagement gazeux notable ne se produise par électrolyse du liquide de suspension. Nous avons utilisé pour ces mesures un double objectif $\times 6$ et deux oculaires micrométriques $\times 10$. Cette combinaison était suffisante pour nous permettre de distinguer nettement les taches de lumière diffusées individuellement par les particules étudiées.

Chaque mesure était accompagnée de mesures de pH et de résistivité du liquide de suspension. Nous avons remarqué qu'une trop forte concentration de la suspension en particules donnait naissance à une lumière parasite, due à la diffusion par l'ensemble des particules, et ne permettait plus de distinguer individuellement celles-ci. Chaque fois que cela était nécessaire, nous avons dilué la suspension par le liquide limpide obtenu par filtration d'une partie de celle-ci, afin de ne pas modifier le potentiel ζ des particules, qui est fonction de la force ionique du liquide de suspension.

A partir des valeurs de la mobilité de chacune des particules, nous avons calculé le potentiel ζ correspondant, en prenant pour valeur de la viscosité et de la constante diélectrique du liquide de suspension, les valeurs de ces grandeurs pour l'eau pure, prises à la même température, données dans les tables.

Les valeurs ainsi obtenues nous ont permis de tracer, pour chaque type de boue, la courbe de répartition donnant le pourcentage de particules ayant un potentiel ζ donné.

Les courbes sont représentées aux pages suivantes.

a) *Boue de lavoir à charbon* (Graphique n° 5):

Conditions expérimentales:

Dilution de la boue: 20 fois.

Résistivité à 20° C = 960 ohms.cm.

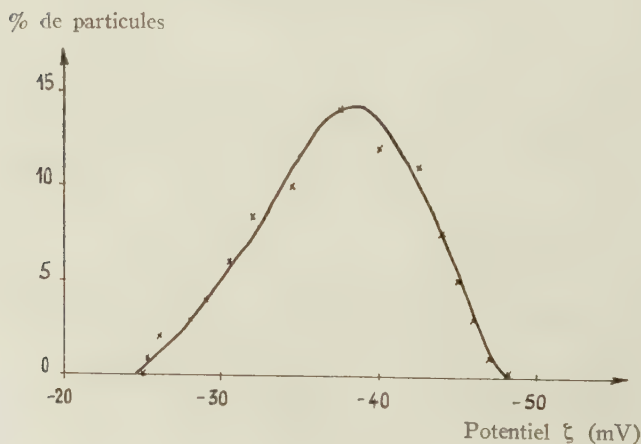
pH = 8,0.

Température de mesure = 20,3° C.

Le tableau placé en dessous de la courbe nous donne les valeurs remarquables de ζ et les mobilités correspondantes qu'elle permet de déterminer.

GRAPHIQUE N° 5

a) Boue de lavoir à charbon.



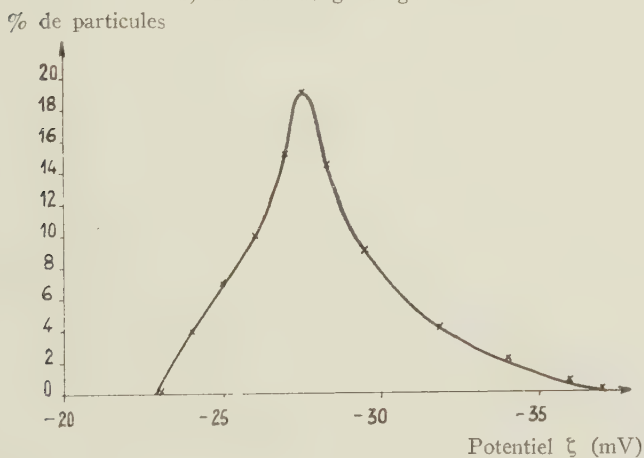
Etalement de la courbe = 22 mV

Valeurs remarquables	Potentiel ζ	Mobilité à la température de mesure microns/seconde
—	—	—
ζ minimum	— 25 mV	1,77
Position du maximum de la courbe ..	— 37,5 mV	2,65
ζ maximum	— 46,7 mV	3,32

b) Eau de lavage de gaz de haut-fourneau n° 1 (Graphique n° 6):

GRAPHIQUE N° 6

b) Eau de lavage de gaz N° 1



Etalement de la courbe = 13 mV

Conditions expérimentales:

Pas de dilution de la suspension.

Résistivité à 20° C = 1 233 ohms.cm.

pH = 8,5.

Température de mesure = 21° C.

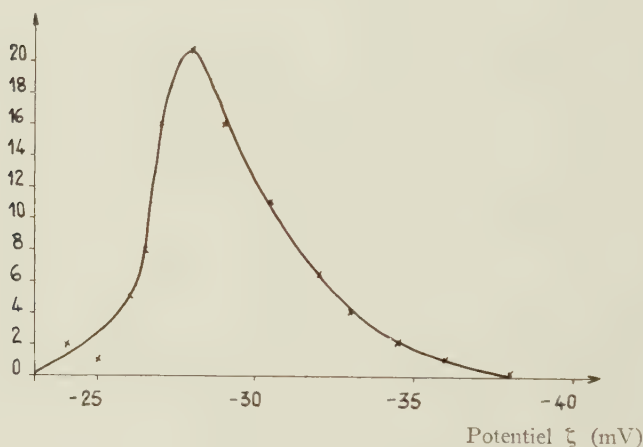
Valeurs remarquables	Potentiel ζ (mV)	Mobilité μ /seconde
ζ minimum	— 28 mV	2,03
Position du maximum de la courbe	— 34 mV	2,50
ζ maximum	— 41 mV	2,98

c) Eau de lavage de gaz n° 2 (Graphique n° 7):

GRAPHIQUE N° 7

c) Eau de lavage de gaz N° 2

% de particules



Etalement de la courbe = 14 mV

Conditions expérimentales:

Pas de dilution de la suspension.

Résistivité à 20° C = 2 264 ohms.cm.

pH = 7,60.

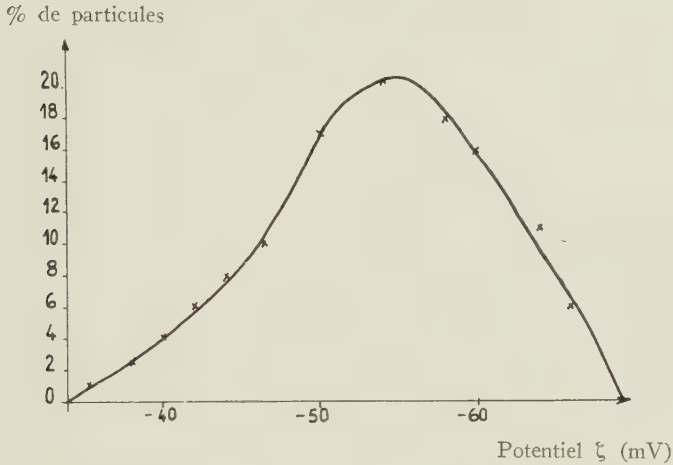
Température de mesure = 15° C.

Valeurs remarquables	Potentiel ζ (mV)	Mobilité μ /seconde
ζ minimum	— 23 mV	1,50
Position du maximum de la courbe	— 27,5 mV	1,76
ζ maximum	— 37 mV	2,35

d) *Boues digérées de station d'épuration* (Graphique n° 8):

GRAPHIQUE N° 8

d) *Boues digérées de stations*



Conditions expérimentales:

Dilution: 100 fois.

Résistivité à 20° C = 570 ohms.cm.

pH = 7,0.

Température de mesure = 16° C.

Etalement de la courbe = 35 mV

Valeurs remarquables	Potentiel ζ (mV)	Mobilité μ /seconde
ζ minimum	— 33 mV	2,22
Position du maximum de la courbe	— 54 mV	3,55
ζ maximum	— 68 mV	4,50

Afin de déterminer le degré de confiance que nous pouvons accorder aux mesures ci-dessus, nous avons évalué la précision atteinte par un calcul statistique en effectuant

5 séries de mesures sur une même suspension homogène, dont toutes les particules doivent avoir le même potentiel ζ .

Nous avons effectué 5 séries de 10 mesures de potentiel ζ sur 5 échantillons d'une même suspension initiale, constituée par des particules de BaSO_4 chimiquement pur, dispersées dans de l'eau distillée. Comme le potentiel est calculé directement à partir de la valeur de la mobilité des particules dans un champ électrique, nous avons effectué notre étude statistique sur les valeurs directement mesurées du temps t mis par les particules pour traverser une graduation du micromètre oculaire du zétamètre lorsque la cellule de micro-électrophorèse est soumise à une différence de potentiel de 100 V.

Les quantités exprimant la précision d'une mesure sont l'erreur moyenne σ_x et l'erreur type σ_x , l'erreur type définissant la précision des mesures avec plus de certitude, car elle donne plus de poids aux erreurs importantes.

Nous avons tout d'abord calculé la moyenne des temps mesurés pour chaque série, puis l'erreur moyenne et l'erreur type.

Les résultats obtenus nous montrent que lorsqu'on veut mesurer le potentiel des particules d'une suspension homogène, si l'on effectue la mesure sur une seule particule, le résultat obtenu pourra différer de 10 % environ de la moyenne des résultats obtenus en mesurant la mobilité de 10 particules, cette valeur étant considérée comme une bonne approximation de la vraie valeur.

Nous évaluons donc la précision d'une mesure individuelle effectuée au zétamètre comme étant approximativement égale à 10 %.

Comme les courbes de répartition des particules sont constituées à partir des valeurs de mobilité des particules mesurées *individuellement*, la précision du tracé de ces courbes ne pourra être meilleure que 10 %. En conséquence, il serait illusoire d'attacher une trop grande importance à une irrégularité locale du tracé de ces courbes. L'ordre de grandeur de la précision atteinte nous explique

pourquoi ces courbes de répartition ne présentent qu'un seul maximum, même dans le cas des suspensions fortement hétérogènes.

Le calcul des probabilités nous montre que si la répartition des erreurs est uniquement due au hasard, la probabilité pour que l'erreur commise soit comprise entre -2σ et $+2\sigma$ est de 95 %.

Par conséquent, nous pourrions dire avec une quasi-certitude qu'une suspension est hétérogène, du point de vue électrique, si son étalement à la base est supérieur à 4 fois la valeur de l'erreur type.

Il nous est nécessaire, en vue des mesures ultérieures, d'estimer l'exactitude d'une moyenne en considérant qu'elle fait partie d'une série de moyennes déterminées d'une manière analogue.

On montre que pour une moyenne portant sur n mesures,

$$a_m = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}, \text{ et } \sigma_m = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}},$$

ce qui est bien vérifié dans le cas présent.

La précision de la moyenne des résultats de 10 mesures peut donc être approximativement évaluée à 3,5 %.

Connaissant la précision des mesures, pour déterminer le degré de confiance qu'on peut accorder aux mesures, il reste à estimer l'exactitude, c'est-à-dire l'écart entre la moyenne des résultats et la vraie valeur. L'exactitude sera d'autant meilleure qu'il n'y aura pas d'erreurs systématiques au cours de la mesure. La principale cause d'erreur possible est un dégagement gazeux dans le compartiment fermé de la cellule à électrophorèse. Chaque fois que nous avons effectué une série de mesures, nous avons vérifié que ce dégagement ne se produit pas, en nous assurant que les résultats trouvés successivement sont répartis au hasard autour de la moyenne. Malgré cela, les résultats obtenus doivent être considérés davantage comme des va-

leurs relatives que comme des valeurs absolues, car il y a, au cours du processus de mesure, des erreurs systématiques difficiles à apprécier.

Connaissant le degré de confiance à accorder à nos mesures, nous avons cherché quels renseignements peuvent nous fournir les courbes de répartition du potentiel ζ en dehors d'une simple description globale des propriétés électriques des particules constituant les différentes boues.

— La position du maximum de la courbe de répartition, qui se confond avec le potentiel ζ moyen lorsque la courbe de distribution est symétrique, est une mesure des forces de répulsion électrostatiques s'exerçant entre les particules; c'est donc un des paramètres décrivant l'état de stabilité du système, puisqu'il est relié directement à la probabilité d'adhésion A entre les particules de la suspension. Cependant, il s'agit d'une grandeur purement descriptive, qui n'apporte aucun renseignement sur la difficulté qu'on peut avoir à augmenter cette probabilité d'adhésion, car l'addition d'un réactif floculant pourra, ou non, diminuer rapidement la valeur de ζ .

— Etant donné l'imprécision qui procède au tracé des courbes de répartition, il ne nous est pas possible d'apprécier exactement la symétrie de celles-ci.

— Nous savons que si l'étalement de la courbe est supérieur à 4 fois l'erreur type, il est pratiquement certain que la suspension est hétérogène du point de vue électrique. Nous avons déterminé pour quels types de boues cela pouvait être mis en évidence:

Type de boue	4 σ_x	Etalement de la courbe
Lavoir à charbon	15 mV	22 mV
Hauts Fourneaux N° 1	13,6 mV	13 mV
Hauts Fourneaux N° 2	11 mV	14 mV
Boues digérées	14 mV	35 mV

Nous pouvons dire avec certitude que les boues de lavoir à charbon et les boues digérées de stations d'épuration sont hétérogènes du point de vue électrique. Pour les deux autres types de boues, cela est moins évident, car nous sommes à la limite d'application du critère que nous avons défini.

Si nous classons ces boues par ordre croissant d'hétérogénéité du point de vue électrique, nous pouvons constater que le classement obtenu coïncide avec le classement d'hétérogénéité physique que l'on peut effectuer à partir des microphotographies figurant au Chapitre I.

2. ACTION DES POLYMERES ORGANIQUES SUR LE POTENTIEL ζ DES PARTICULES EN SUSPENSION

Nous avons vu au chapitre précédent que la floculation des particules en suspension pouvait être due à plusieurs causes différentes, dont l'une était l'augmentation de la probabilité d'adhésion entre particules, conséquence à une diminution du potentiel ζ . Nous avons voulu déterminer dans quelle mesure l'action floculante de polymères organiques commerciaux était due à l'abaissement du potentiel des particules.

Pour cela, nous avons étudié les variations du potentiel ζ des particules en fonction de la dose de floculant ajoutée. La valeur moyenne du temps de parcours d'une graduation du micromètre oculaire est obtenue à partir des mesures effectuées sur 10 particules se déplaçant dans un sens sous l'action d'une différence de potentiel égale ou inférieure à 100 volts, suivant la conductivité du liquide de suspension, puis sur 10 particules se déplaçant sous l'action de la même différence de potentiel, la polarité des électrodes étant simplement inversée. Chaque mesure de mobilité des particules, après addition d'une dose de réactif, était précédée d'une mesure de pH, de conductivité et de température sur la suspension, la valeur de la conductivité déterminant la grandeur de la différence de po-

tentiel pouvant être appliquée. Lorsque cela était nécessaire, nous avons dilué les suspensions, en prenant les précautions énoncées précédemment.

A. — CARACTÉRISTIQUES DES POLYMÈRES UTILISÉS

Tous les produits utilisés peuvent se rattacher à l'un des trois types suivants:

a) *Polyélectrolytes cationiques:*

Il s'agit de polymères de masses moléculaires comprises entre 20 000 et 100 000. Ces polymères sont constitués de longues chaînes portant des groupements chimiques substitués ionisables en solution aqueuse, la partie restant fixée à la chaîne acquérant un caractère cationique.

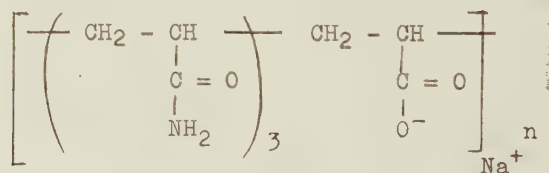
Nous avons employé trois polyélectrolytes cationiques différents, que nous avons appelés C₁, C₂, C₃.

b) *Polyélectrolytes anioniques:*

Ce sont généralement des polyacrylonitriles hydrolysés ou des copolymères acrylamide - acrylate; ils portent en proportion variable des groupements anioniques COO⁻.

A₁ est un polyacrylonitrile hydrolysé.

A₂ est un copolymère acrylamide-acrylate, de masse moléculaire comprise entre 2 et 3 000 000. Il correspond à la formule suivante:

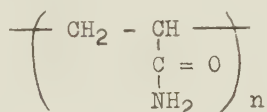


En milieu acide (pH = 3), ce polymère prend un caractère non ionique.

A₃ est un copolymère acrylamide - acrylate, de masse moléculaire de l'ordre de 1 000 000.

c) *Polymères non ioniques*:

Dans pratiquement tous les cas, ce sont des polyacrylamides de haute masse moléculaire; leur formule générale est la suivante:



Les groupements amides peuvent, suivant le milieu, s'hydrolyser en carboxyles COO^- , conférant à ces polymères un caractère très légèrement anionique.

Nous avons utilisé 4 de ces polymères, différents par leurs masses moléculaires:

N_1 : masse moléculaire M de l'ordre de 1 000 000,

N_2 : masse moléculaire $1\,000\,000 < M < 2\,000\,000$,

N_3 : masse moléculaire $3\,000\,000 < M < 5\,000\,000$,

N_4 : masse moléculaire $6\,000\,000 < M < 10\,000\,000$.

B. — ACTION DES POLYÉLECTROLYTES CATIONIQUES
SUR LE POTENTIEL ζ DES PARTICULES EN SUSPENSION

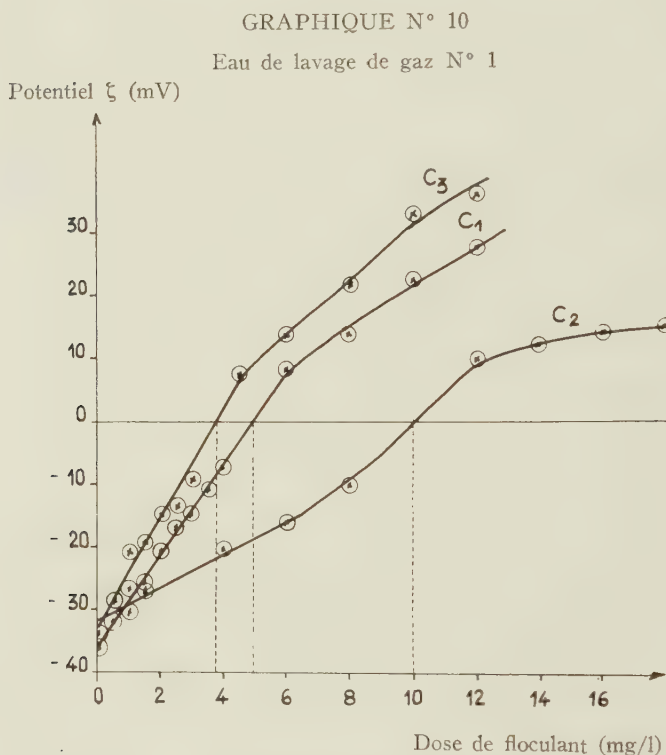
Les courbes donnant le potentiel ζ des particules en suspension en fonction de la dose des polyélectrolytes C_1 , C_2 , C_3 ajoutés sont représentées ci-après pour les quatre types de boues étudiés.

Interprétation des résultats.

Dans tous les cas, l'addition de polyélectrolyte cationique, à une dose convenable, permet de ramener le potentiel ζ moyen des particules d'une valeur négative initiale à zéro, une addition supplémentaire inversant le signe de la charge des particules.

Toutes les courbes obtenues ont l'allure générale suivante (graphiques n° 9, 10, 11 et 12):

A partir de la valeur initiale du potentiel ζ , elles présentent une partie approximativement rectiligne. Nous ne pouvons pas tracer expérimentalement ce segment de droite au-delà d'une certaine limite, à partir de laquelle la vitesse de passage d'une particule à travers une gradua-



tion du micromètre oculaire devient suffisamment faible pour que son mouvement soit perturbé par des effets de convection thermique dans la cellule.

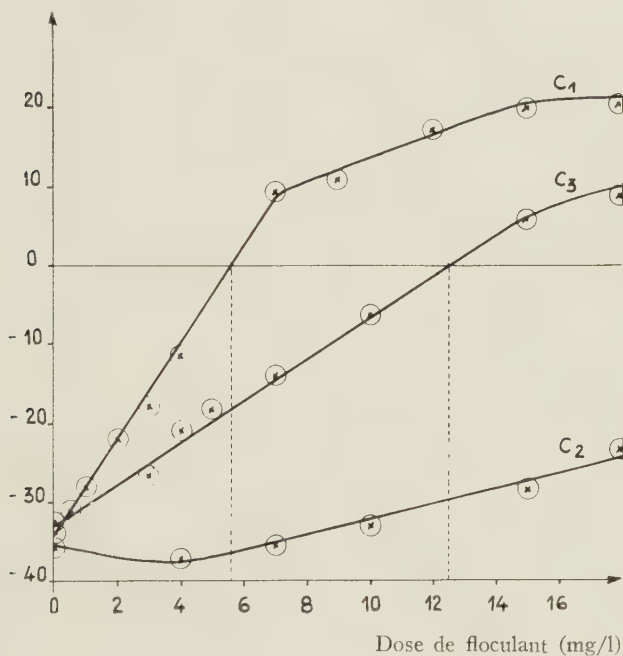
Nous obtiendrons la valeur de la dose de polyélectrolyte annulant le potentiel ζ des particules en prenant l'intersection de la droite $\zeta = 0$ avec le segment joignant les points représentatifs des deux plus faibles valeurs de potentiel ζ mesurées, l'une étant positive et l'autre négative. Nous avons remarqué que lorsque $\zeta = 0$, toutes les par-

ticules ne sont pas immobiles dans le champ électrique, une minorité d'entre elles se déplacent dans un sens, un nombre égal se déplaçant dans le sens opposé.

GRAPHIQUE N° 11

Eau de lavage de gaz N° 2

Potentiel ζ (mV)

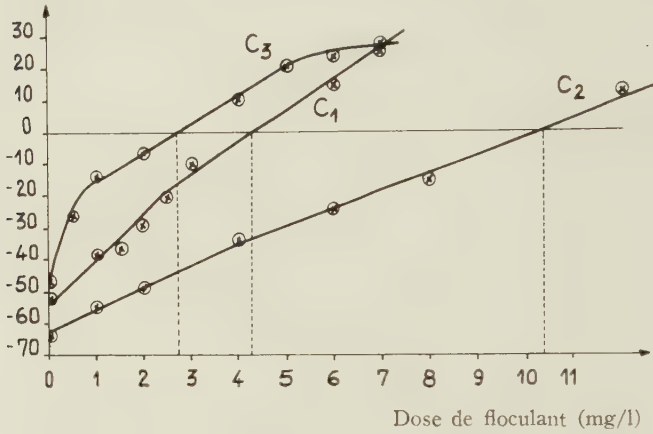


Cette première partie de la courbe nous montre que l'abaissement du potentiel ζ moyen des particules de la suspension, donc la quantité de charges électriques élémentaires positives provenant du polyélectrolyte ayant neutralisé une quantité égale de charges négatives portées par les particules de la suspension, est proportionnel à la quantité de polyélectrolyte ajoutée. Cela résulte de ce que les forces prédominant au cours de cette première phase sont essentiellement des forces électrostatiques d'attraction entre les chaînes moléculaires du polyélectrolyte et

GRAPHIQUE N° 12

Boues digérées de Stations d'épuration

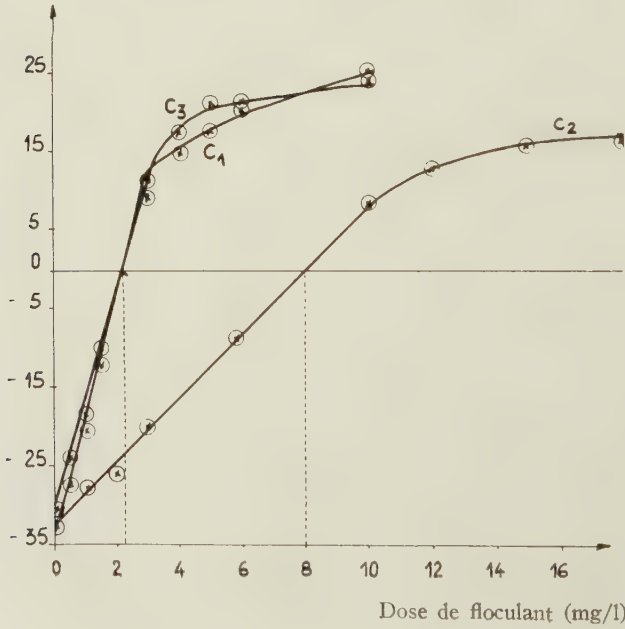
Potentiel ζ (mV)



GRAPHIQUE N° 9

Boue de lavoir à charbon

Potentiel ζ (mV)



les particules chargées de signe opposé. La pente de cette partie rectiligne est une mesure de la faculté qu'a un polyélectrolyte donné d'abaisser le potentiel ζ des particules d'une suspension donnée.

Au-delà de la première valeur positive du potentiel ζ , la courbe présente dans certains cas une seconde partie rectiligne, de pente inférieure à celle de la première; il est possible que cette partie corresponde à la neutralisation des particules de la suspension de potentiel ζ négatif, par les particules de potentiel ζ positif, qui sont de plus en plus nombreuses dans la suspension. Le changement de signe du potentiel ζ , après addition d'une certaine dose de polyélectrolyte cationique, s'explique par une adsorption des chaînes moléculaires chargées positivement sur les particules devenues électriquement neutres.

A partir de l'addition d'une dose de polyélectrolyte plus grande, la courbe commence à s'infléchir pour atteindre un palier qui correspond à un équilibre entre les forces d'adsorption et les forces de répulsion électrostatique entre les chaînes moléculaires chargées positivement et les particules de même signe de la suspension. Des essais effectués sur d'autres types de suspensions nous ont montré que l'allure des courbes obtenues est très générale dans le cas de l'addition de polyélectrolytes cationiques.

Notre description du phénomène permet de définir trois grandeurs caractérisant l'action d'un polyélectrolyte cationique sur une suspension donnée. Ce sont :

La pente de la première partie rectiligne de la courbe, exprimée en mV par mg/l.

La dose d de polyélectrolyte annulant le potentiel ζ , exprimée en mg/l.

La hauteur du palier de la courbe lorsqu'il est accessible, en mV.

Ces différentes grandeurs, déterminées pour les quatre types de boues étudiées, figurent dans les trois tableaux suivants :

1. *Pente de la première partie rectiligne:*

	C_1	C_2	C_3
Polyélectrolyte			
Boue de lavoir à charbon	14,3	4,0	13,5
Lavage de gaz N° 1	7,2	3,4	9,2
Lavage de gaz N° 2	5,9	0,7	2,7
Boues digérées	12,2	4,3	10,0

2. *Dose de polyélectrolyte cationique annulant ζ moyen:*

Type de boue	C_1	Polyélectrolyte C_2	C_3
Lavoir à charbon	2,3 mg/l	8,0 mg/l	2,3 mg/l
Lavage de gaz N° 1	5,0	10	3,7
Lavage de gaz N° 2	5,7	très grande	12,5
Boues digérées	4,3	10,3	2,8

Ces deux tableaux nous permettent de classer les polyélectrolytes dans l'ordre de leur efficacité à abaisser le potentiel ζ des particules. La comparaison entre ce classement et le classement des mêmes polyélectrolytes suivant leur pouvoir flocculant nous permettra ultérieurement de déterminer dans quelle mesure il y a une relation entre l'abaissement du potentiel ζ et le phénomène de floculation.

3. *Hauteur du palier final:*

Type de boue	C_1	Polyélectrolyte C_2	C_3
Lavoir à charbon	25 à 30 mV	16 mV	25-30 mV
Lavage de gaz N° 1	supérieur à 28 mV	18 mV	40 mV
Lavage de gaz N° 2	20 mV	—	supérieur à 10 mV
Boues digérées	supérieur à 27 mV	20 mV	25 mV

Nous remarquons que les hauteurs de ces paliers se classent exactement dans le même ordre que les valeurs des pentes des parties rectilignes figurant ci-dessus. Si la quantité adsorbée à l'équilibre est du même ordre de grandeur pour tous les polyélectrolytes, la valeur du potentiel ζ correspondante sera d'autant plus grande que le polyélectrolyte utilisé aura un caractère cationique prononcé.

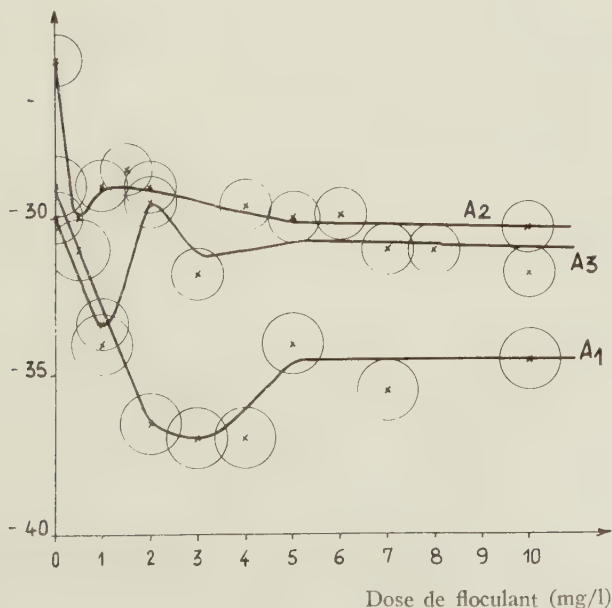
C. — ACTION DES POLYÉLECTROLYTES ANIONIQUES SUR LE POTENTIEL ζ DES PARTICULES EN SUSPENSION

Les courbes donnant le potentiel ζ moyen des particules de la suspension en fonction de la dose des polyélectrolytes A_1 , A_2 , A_3 ajoutée, sont représentées aux pages suivantes pour les 4 types de boues étudiés (graphiques n° 13, 14, 15 et 16).

GRAPHIQUE N° 13

Boue de lavoir à charbon

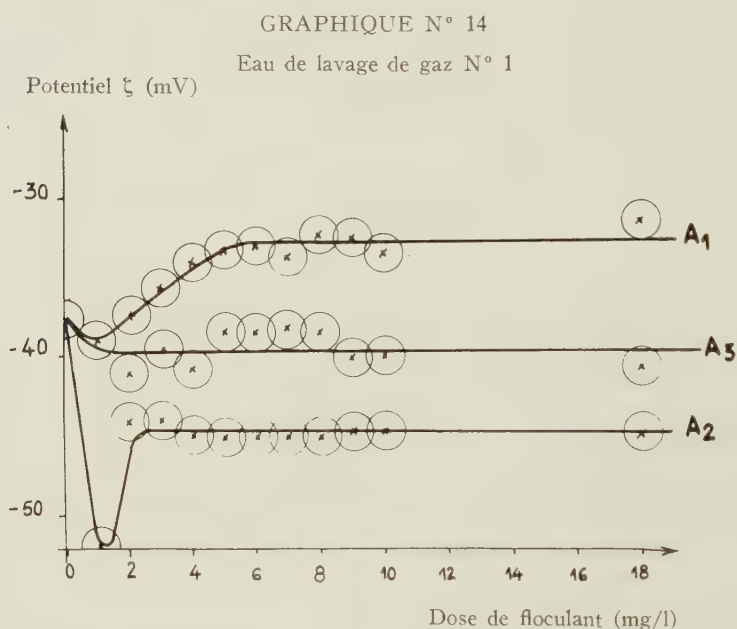
Potentiel ζ (mV)



Interprétation des résultats.

Toutes les courbes ainsi tracées présentent un caractère commun dans leur allure :

L'addition d'une quantité de polyélectrolyte, variant suivant les cas de 0,5 à 4 mg/l, provoque une décroissance généralement assez brusque du potentiel ζ , qui devient davantage négatif, puis une addition supplémentaire de réactif provoque une augmentation du potentiel ζ jusqu'à ce que la courbe atteigne un palier. Nous proposons l'explication suivante de l'allure de ces courbes :



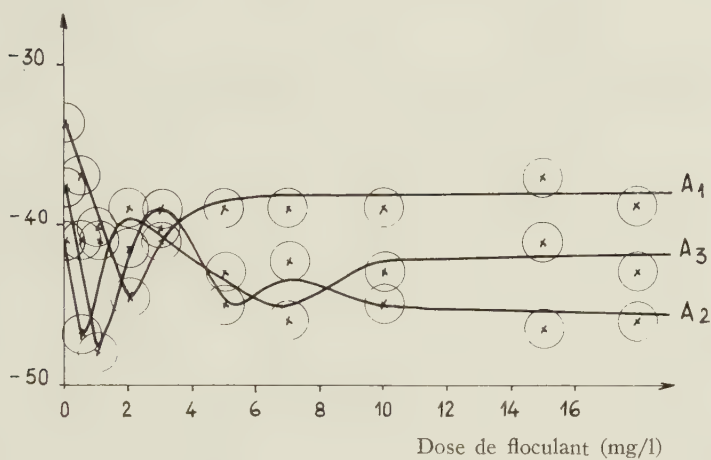
Dès l'addition du réactif, les molécules de polyélectrolyte chargées négativement s'adsorbent sur les particules de la suspension, malgré le potentiel ζ négatif de celles-ci, rendant le potentiel davantage négatif.

A partir d'une certaine dose de polyélectrolyte, il y a une rétrogradation de l'ionisation des groupements portés par les chaînes moléculaires adsorbées sur les particules,

GRAPHIQUE N° 15

Eau de lavage de gaz N° 2

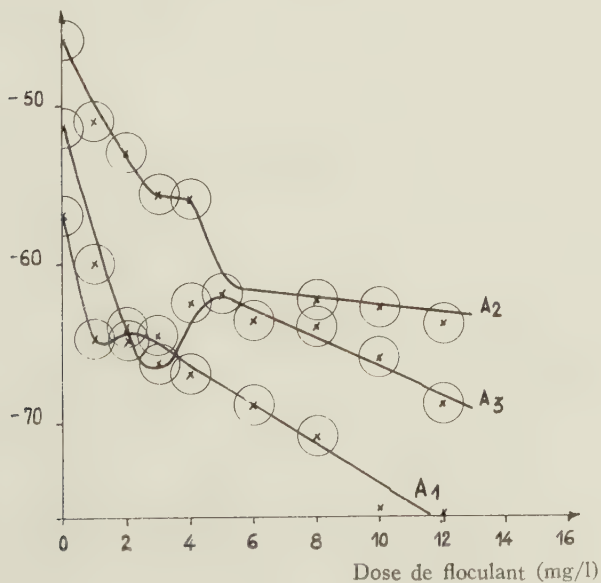
Potentiel ξ (mV)



GRAPHIQUE N° 16

Boues digérées de Stations d'épuration.

Potentiel ξ (mV)



ou une désorption du polyélectrolyte à la surface des particules, et le potentiel ζ redevient moins négatif, jusqu'à ce qu'il s'établisse un état d'équilibre où le potentiel ζ demeure constant.

Les grandeurs caractéristiques de l'action d'un polyélectrolyte anionique sur un type de boue donné sont:

l'amplitude de la chute initiale du potentiel ζ , exprimée en mV.

la position du palier final par rapport au potentiel ζ initial.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans les deux tableaux suivants.

1. *Amplitude de la chute initiale de potentiel ζ :*

Type de boue	Polyélectrolyte		
	A_1	A_2	A_R
Lavoir à charbon	8 mV	5 mV	3,5 mV
Lavage de gaz N° 1	1	14	3
Lavage de gaz N° 2	11	10,5	6
Boues digérées	8	—	14

2. *Position du palier final par rapport à ζ initial:*

Type de boue	Polyélectrolyte		
	A_1	A_2	A_R
Lavoir à charbon	— 6 mV	— 5,5 mV	— 2 mV
Lavage de gaz N° 1	+ 6	— 7	— 3
Lavage de gaz N° 2	— 5	— 8	— 2
Boue digérée	— 9,5	— 9	—

En conclusion, l'addition d'un polyélectrolyte anionique diminue le potentiel ζ moyen des particules en suspension.

Il en résulte que leur action floculante éventuelle n'est en aucun cas liée à la variation du potentiel ζ qu'ils sont susceptibles de provoquer.

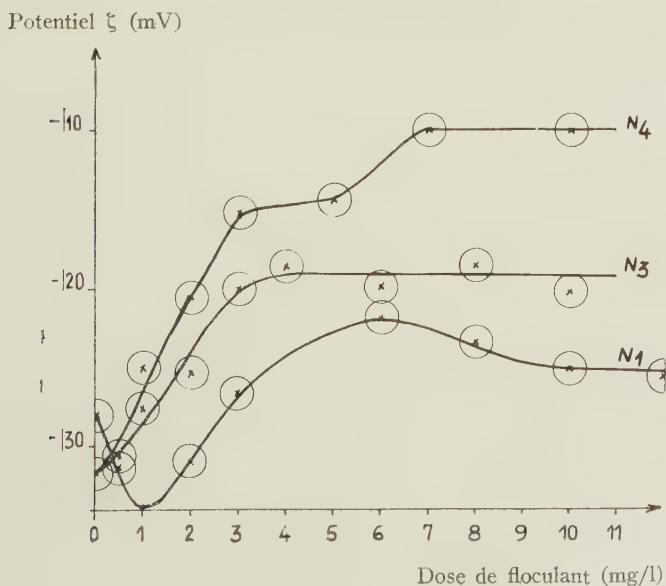
D. — ACTION DES POLYMÈRES NON IONIQUES
SUR LE POTENTIEL ζ DES PARTICULES EN SUSPENSION

Nous avons représenté ci-après les courbes donnant le potentiel ζ moyen des particules en fonction des doses des polymères N_1 , N_3 et N_4 ajoutés (graphiques n° 17, 18, 19, 20).

Interprétation des résultats.

L'addition de polymères organiques non ioniques modifie généralement le potentiel ζ des particules en suspension. Dans la majorité des cas, celui-ci devient moins négatif.

GRAPHIQUE N° 17
Boue de lavoir à charbon

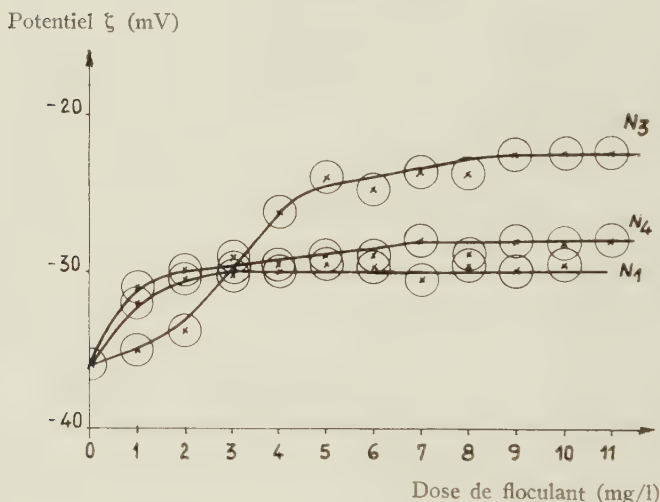


Ce phénomène est dû à l'adsorption des molécules de polymères sur les particules, formant une couche superficielle qui modifie l'état de surface des particules, donc leur potentiel ζ .

La courbe tracée ressemble à un isotherme d'adsorption. Elle présente un palier dans sa partie finale. La position de ce palier par rapport à la valeur initiale du potentiel ζ est une caractéristique de l'action du polymère utilisé. Les hauteurs de ces paliers sont rassemblées dans le tableau suivant.

GRAPHIQUE N° 18

Eau de lavage de gaz N° 1

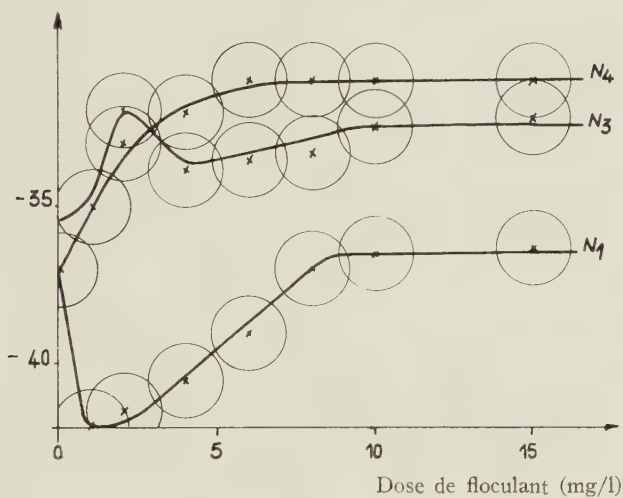


Type de boue	N ₁	Polymère N _R	N ₄
Boue de lavoir à charbon	+ 5,5 mV	+ 12,5 mV	+ 21,5 mV
Boue de lavage de gaz N° 1	+ 6	+ 13,5	+ 8
Boue de lavage de gaz N° 2	+ 0,5	+ 3	+ 6
Boues digérées	- 7	+ 3	+ 8

GRAPHIQUE N° 19

Eau de lavage de gaz N° 2

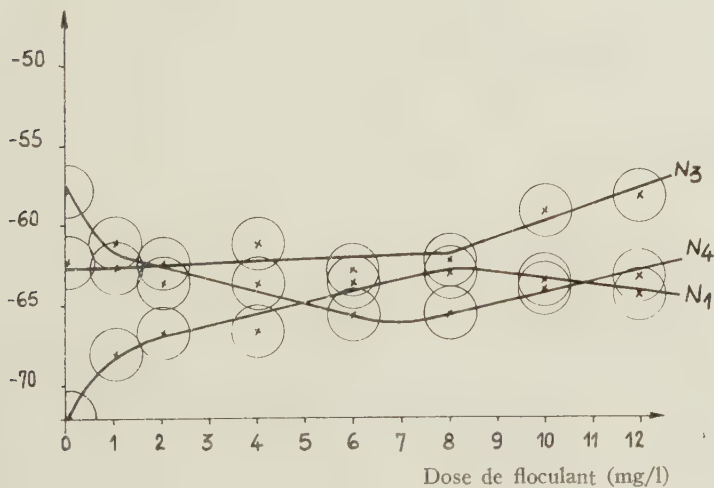
Potentiel ξ (mV)



GRAPHIQUE N° 20

Boue digérée de Stations d'épuration

Potentiel ξ (mV)



Dans le cas du polymère N₁, nous remarquons sur deux courbes une brusque chute du potentiel ζ dès l'addition du polymère. Il se produit donc, dans ce cas, un phénomène identique à celui observé dans le cas des polyélectrolytes anioniques. Nous pensons que cela est dû à l'hydrolyse en carboxyles COO^- de certains groupements amides portés par les chaînes moléculaires, le polymère non ionique devenant ainsi un polyélectrolyte anionique. Ce phénomène n'apparaît que dans les suspensions où le pH est voisin de 8, ce pH correspondant au maximum d'hydrolyse.

Essais de floculation par les polymères et polyélectrolytes organiques

Nous avons effectué ces essais afin de déterminer empiriquement, par la méthode des « jar-tests », les doses des différents flocculants organiques nécessaires pour provoquer une floculation de la boue.

Mode opératoire.

Six gros béchers, remplis chacun de 2 litres de boue, sont brassés simultanément par des agitateurs entraînés par un moteur commun. Après avoir homogénéisé les suspensions, le dispositif utilisé permet d'ajouter à chacun, au même moment, des doses différentes de flocculant, l'une de celles-ci étant nulle, et le bécher correspondant servant de témoin. Après une agitation douce de 10 minutes, on observe l'aspect des flocons formés, et après une décantation de 15 minutes, on apprécie la turbidité du liquide sur-nageant.

Tous les résultats obtenus sont représentés sous forme de tableaux aux pages suivantes. Nous y avons fait figurer la dose minimum nécessaire pour produire la floculation, et les modifications qu'entraînait l'utilisation de doses plus élevées de flocculants.

Ces essais ont été réalisés sur chaque type de boue avec tous les flocculants dont nous disposions.

A. — FLOCCULATION DES BOUES DE LAVOIR A CHARBON

Polyélectro- lyte ou Polymère	Dose mg/l	Qualité de la floculation ou taille des flocons	Aspect du liquide sur- nageant après décantation
C ₁	2	Flocons très petits	Très trouble
	4	Taille intermédiaire	Trouble.
	10	Flocons de 1 mm	Trouble.
C ₂	4	Formation de petits flocons	Très trouble.
	10	Même aspect des flocons.	La turbidité diminue mais reste toujours importante.
C ₃	Comportement identique à celui de C ₁ .		
A ₁	2	Flocons inférieurs à 1 mm	Très trouble.
	20	Pas d'amélioration	Aucune amélioration.
A ₂	2	Très bonne flocu- lation. Flocons pouvant atteindre 5 mm.	Parfaitement limpide.
A ₃		Formation de flo- cons de 1 à 2 mm	Légère turbidité.
N ₁	2	Flocons de 1 mm.	Turbidité très élevée.
	4 et plus	Flocons compris entre 2 et 3 mm	Aucune particule visible en suspension. Opalescence.
N ₃	2	Flocons de 1 mm. Floculation moyenne.	Turbidité élevée.
	4	Flocons de 2 à 3 mm. Bonne floculation.	Turbidité moyenne.
	6	Bonne floculation (2 mm).	Faible turbidité.
N ₄	4	Bonne floculation. Flocons de 2 à 3 mm. La taille des flocons augmente avec la dose de floculant.	Turbidité moyenne, qui ne varie pas avec la dose de floculant.
	10		

B. — FLOCCULATION DE L'EAU DE LAVAGE
DE GAZ DE HAUT-FOURNEAU N° 1

Polyélectro- lyte ou Polymère	Dose mg/l	Qualité de la floculation ou taille des flocons	Aspect du liquide surnageant après décantation
C ₁	5	Formation de très petits flocons inférieurs à 1 mm	Forte turbidité.
	10	Aucune amélioration	
C ₂	0 à 10	Aucune floculation	
C ₃	4	Petits flocons inférieurs à 1 mm	Très forte turbidité.
	10	Pas d'amélioration en augmentant la dose.	
A ₁		Aucun résultat à toutes les doses.	
A ₂	A par- tir de 5	Formation de flocons de 1 mm	Forte turbidité.
A ₃	2	Flocons inférieurs à 1 mm	Très forte turbidité.
	10	Aucune amélioration.	
N ₁	2	Flocons inférieurs à 1 mm	Légère turbidité.
	4	Flocons de 1 mm	Légère turbidité.
	4 à 10	Aucune amélioration.	
N ₃	5	Flocons de 1 mm	Turbidité moyenne.
	5 à 10	Aucune amélioration.	
N ₄	5	Flocons de 1 mm	Turbidité moyenne.

C. — FLOCCULATION DE L'EAU DE LAVAGE
DE GAZ DE HAUT-FOURNEAU N° 2

Polyélectro- lyte ou Polymère	Dose mg/l	Qualité de la floculation ou taille des flocons	Aspect du liquide surnageant après décantation
C ₁	4	Bonne floculation, flocons compris entre 1 et 2 mm	Légère turbidité.
		Pas d'amélioration pour une dose supplémentaire.	
C ₂		Aucune action à toutes les doses.	
C ₃	10	Bonne floculation, flocons de 1 à 2 mm	Légère turbidité.
A ₁		Aucune action à toutes les doses.	
A ₂	1	Flocons de 1 à 2 mm	Limpidité.
	5	Flocons de 1 à 2 mm	Turbidité de plus en plus grande quand la dose de flocculant croît
A ₃	à partir de 2	Bonne floculation.	Légère turbidité.
N ₁	à partir de 2	Bonne floculation.	Limpide.
N ₃	à partir de 0,5	Bonne floculation.	Légère turbidité.
N ₄	0,2 à 0,5	Bonne floculation.	Légère turbidité?
	à partir de 0,5	Bonne floculation.	Limpide.

D. — FLOCCULATION DE BOUES DIGÉRÉES DE STATIONS D'ÉPURATION

Polyélectro- lyte ou Polymère	Dose mg/l	Qualité de la floculation ou taille des flocons	Aspect du liquide interstitiel
C ₁	à partir de 750	floculation rapide! flocons volumineux!	Très limpide.
C ₂	à partir de 800	Bonne floculation. Flocons plus petits qu'avec C ₁ .	Légère turbidité.
C ₃	à partir de 200	Très bonne floculation.	Très limpide.
A ₁ , A ₂ , A ₃	Aucune floculation à toutes les doses.		
N ₁	à partir de 500	Floculation moyenne. Les flo- cons sont plus petits qu'avec les polyélectro- lytes cationiques!	Légère turbidité.
N ₃	à partir de 400		
N ₄	à partir de 400		

Les boues de stations d'épuration utilisées ne décantant pas statiquement après floculation, nous avons apprécié la turbidité du liquide interstitiel obtenu par filtration d'une petite quantité de boue.

E. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

a) Polyélectrolytes cationiques.

Dans le cas de la boue de lavoir à charbon et des deux eaux de lavage de gaz de hauts-fourneaux, c'est-à-dire dans le cas des boues de nature purement minérale, les polyélectrolytes cationiques présentent la propriété commune de former des flocons de petite taille, généralement comprise entre 0,25 et 2 mm. Les doses nécessaires pour provoquer un début de floculation se révèlent être égales ou légèrement inférieures à celles qui sont nécessaires pour annuler le potentiel ζ des particules en suspension. Nous en concluons que ce type de flocculant agit essentiellement

par neutralisation de la charge électrique négative portée par les particules, augmentant ainsi la probabilité d'adhésion des particules entre elles, A. Dans certains cas, la floculation se produit alors que le potentiel ζ n'est pas encore annulé ($-10 < \zeta < 0$ mV). Cela arrive lorsque les forces d'attraction sont suffisantes pour vaincre la répulsion électrostatique qui s'exerce encore. En plus des forces d'attraction normales, il est probable que des phénomènes d'adsorption interviennent: une chaîne moléculaire s'adsorbant à la surface de deux particules différentes et les reliant par un « pont » matériel; — phénomène mis en évidence par LAMER, SMELLIE, HEALY. Toutefois, cet effet doit rester limité dans le cas des polyélectrolytes cationiques utilisés, puisque la floculation se produit au voisinage de $\zeta = 0$.

Cela provient de ce que ces polyélectrolytes ont des masses moléculaires relativement faibles par rapport aux autres types de polymères et polyélectrolytes utilisés.

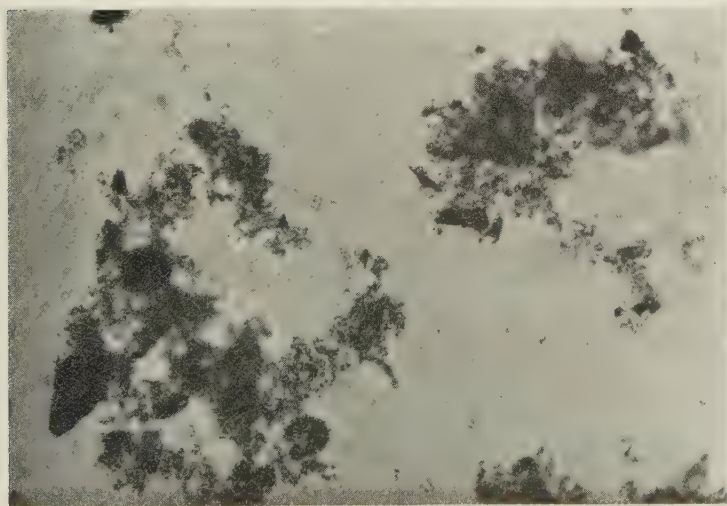


PHOTO n° 10

Grossissement 270 fois.

Boue de lavoir à charbon floculée par un polyélectrolyte cationique.

Les particules de petite taille se sont agglomérées entre elles pour former un flocon de petite dimension: 0,25 mm.

Dans le cas des boues digérées de stations d'épuration, la dose de polyélectrolyte cationique nécessaire à la floculation est très supérieure à celle qui était nécessaire pour annuler le potentiel ζ de la même boue diluée. Toutefois, les doses de polyélectrolyte rapportées à la quantité de matière sèche contenue dans la boue sont du même ordre de grandeur.

Dans tous les cas, une addition supplémentaire de polyélectrolyte, bien que donnant aux particules un potentiel ζ positif, ne semble pas affecter le phénomène de floculation, mais ne diminue pas la turbidité du liquide obtenu après décantation.

En conclusion, les polyélectrolytes cationiques que nous avons utilisés agissent essentiellement par neutralisation des charges électriques. Il en résulte que les plus efficaces en tant que floculants sont ceux qui sont les plus efficaces pour abaisser le potentiel ζ des particules de la suspension étudiée. Le choix du polyélectrolyte le plus efficace et la détermination de l'ordre de grandeur de la dose nécessaire pourront être faits rigoureusement à partir d'une étude de l'action de ces produits sur les propriétés électriques des particules en suspension.

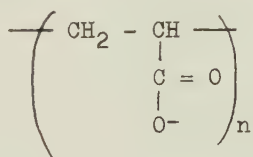
b) *Polyélectrolytes anioniques.*

Nous avons constaté précédemment que ces produits abaissent généralement le potentiel ζ des particules en suspension, augmentant ainsi la répulsion électrostatique entre les particules. Pourtant, dans le cas des particules de nature minérale, certains de ces polyélectrolytes ont une action remarquable, tandis que d'autres n'ont aucune action. Dans le cas des boues digérées de stations d'épuration, ces polyélectrolytes n'ont aucune action. Des essais ultérieurs de filtration nous montreront qu'ils exercent au contraire une action dispersante.

Comme ces polyélectrolytes ne diminuent pas le potentiel ζ des particules, ils ne peuvent avoir une action flocu-

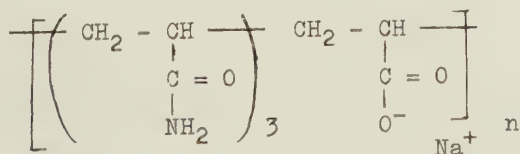
lante qu'en augmentant le rayon R des sphères d'attraction des particules. Nous pensons que cela est dû à l'adsorption des groupements portés par une seule chaîne moléculaire sur plusieurs particules, reliant celles-ci entre elles mécaniquement. Les particules étant chargées négativement, l'adsorption ne peut se faire que par des groupements électriquement neutres (probablement formation de liaisons H).

C'est ainsi que pour le polyélectrolyte A₁, l'adsorption est difficile, car la chaîne moléculaire ne porte que des groupements



chargés négativement. Expérimentalement, nous avons bien constaté que ce polyélectrolyte est inefficace dans pratiquement tous les cas.

Par contre, pour le polyélectrolyte A₂, qui correspond à la formule ci-dessous :



les groupements amides portés par la chaîne moléculaire peuvent s'adsorber à la surface des particules, et il en résulte le pouvoir floculant de ce polyélectrolyte. Dans certains cas, comme celui des boues de lavoir à charbon, l'efficacité du polyélectrolyte A₂ se révèle supérieure à celle de tous les autres polymères. Nous pensons que cela est dû à l'existence des groupements anioniques répartis périodiquement sur la chaîne moléculaire, qui, par répulsion

électrostatique entre eux, confèrent à la chaîne la plus grande extension possible.

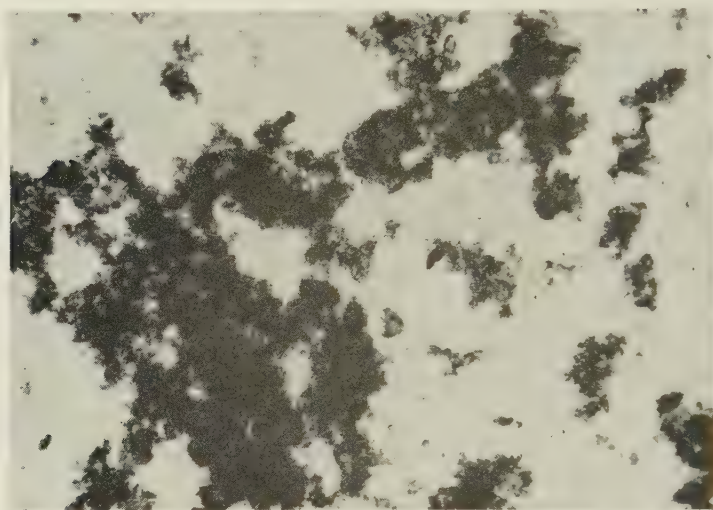


PHOTO n° 11

Grossissement 110 fois.

Boue de lavoir à charbon floculée par un polyélectrolyte anionique. Les flocons formés sont beaucoup plus grands qu'avec un polyélectrolyte cationique, et peuvent atteindre 7 mm. Ici, un flocon de l'ordre de 1 mm.

c) *Polymères non ioniques.*

Ces polymères modifiant peu, ainsi que nous l'avons vu, le potentiel ζ des particules en suspension, ne peuvent agir que par augmentation de la sphère d'attraction des particules. Leur mécanisme d'action est identique à celui que nous avons décrit pour les polyélectrolytes anioniques. Dans certaines conditions de pH, les groupements amides portés par les chaînes moléculaires peuvent s'hydrolyser en carboxyles COO^- . C'est le cas pour le polymère N₁ à pH = 8. Ce phénomène se traduit par une opalescence du liquide clarifié obtenu après décantation.

En conclusion, l'étude de l'action des polyélectrolytes anioniques et des polymères non ioniques fait intervenir

des phénomènes d'adsorption, et par conséquent, le choix de l'un de ces produits ne pourra se faire par des considérations faisant uniquement intervenir les propriétés électriques des particules en suspension.

Il peut être intéressant de mettre en évidence l'effet des polyélectrolytes anioniques et cationiques en fonction du pH des boues traitées. Nous avons constaté, d'une manière générale, que les polyélectrolytes cationiques permettent d'obtenir une bonne floculation pour la boue de lavage de gaz n° 2 ($\text{pH} = 7,60$) et pour les boues de stations d'épuration d'eaux urbaines ($\text{pH} = 7,0$), alors que la floculation est moins bonne dans le cas de la boue de lavoir à charbon ($\text{pH} = 8,40$) et de la boue de lavage de gaz n° 1 ($\text{pH} = 9,70$). Il apparaît donc que les polyélectrolytes cationiques sont peu efficaces en milieu basique, alors qu'ils le sont au voisinage de la neutralité. Cette remarque est en accord avec des essais effectués au laboratoire sur des boues fortement basiques ($\text{pH} = 12,5$).

Les polyélectrolytes anioniques sont efficaces en milieu basique, mais nous n'avons pas effectué d'essais avec des boues acides, et ne pouvons énoncer aucune conclusion générale pour ce type de produit.

CHAPITRE IV

APPLICATION DES TRAITEMENTS DE FLOCULATION A LA DECANTATION DES BOUES RESIDUAIRES

Dans le cas des suspensions de faible concentration en solides, le problème de la décantation est résolu d'une façon satisfaisante par l'application de la loi de STOKES; mais aux fortes concentrations, les conditions de la sédimentation sont considérablement modifiées, la vitesse de chute des particules se trouvant fortement diminuée par suite des effets d'interférence mutuelle entre particules et de la vitesse ascendante du fluide déplacé au cours de la sédimentation, qui n'est plus négligeable.

Le processus est alors connu sous le nom de décantation freinée. En 1916, COE et CLEVINGER (11) mirent en évidence deux modes de sédimentation distincts, selon que le phénomène s'accompagnait ou non de la formation d'une interface entre le liquide de suspension et une phase fluide contenant la totalité des matières en suspension. De nombreux essais furent effectués pour prévoir la vitesse de sédimentation d'une suspension concentrée. ROBINSON (12) suggéra de modifier la loi de STOKES en utilisant la densité et la viscosité de la suspension à la place des propriétés du liquide, la viscosité pouvant être obtenue à l'aide

de la formule d'EINSTEIN. VAND (13) établit une relation empirique valable pour des suspensions plus concentrées, et STEINOUR (14) tint compte, de plus, d'une fonction de la porosité de la suspension. D'une manière générale, les relations ainsi établies ne sont applicables que dans une zone restreinte de conditions, et impliquent des constantes qu'il faut déterminer expérimentalement pour chaque suspension. Le problème n'a été résolu d'une façon satisfaisante que par l'application de la théorie de KYNCH (15).

I. — Exposé rapide de la théorie de KYNCH

En 1952, G.-J. KYNCH a publié une théorie décrivant mathématiquement le phénomène, sans qu'il soit nécessaire de connaître en détail les forces qui agissent sur les particules et les processus physiques impliqués.

Son hypothèse fondamentale consiste à dire que la vitesse de chute, v , d'une particule dépend uniquement de la concentration locale en particules, c . Cette hypothèse avait déjà été émise par COE et CLEVINGER.

Supposons qu'au cours de la sédimentation il se forme une discontinuité, c'est-à-dire une brusque variation de concentration à un certain niveau. Soient c_1 et c_2 les concentrations en particules de part et d'autre de la discontinuité, v_1 et v_2 les vitesses de chute des particules correspondantes, et U la vitesse de déplacement de la discontinuité. Comme il n'y a aucune accumulation de particules, nous pouvons écrire que le flux de particules se conserve à travers la discontinuité:

d'où:

$$c_1 (v_1 + U) = c_2 (v_2 + U),$$

$$U = \frac{c_1 v_1 - c_2 v_2}{c_2 - c_1} = \frac{S_1 - S_2}{c_2 - c_1}$$

si nous posons $S = cv$,

Soit $V(c)$ la vitesse de propagation d'une discontinuité entre deux concentrations très voisines: c et $c + dc$. Nous

avons donc $V(c) = \frac{dS}{dc}$. Si nous traçons le diagramme

$h = f(t)$ représentant la hauteur d'un niveau quelconque à partir de la base de la colonne de particules dispersées en fonction du temps, une courbe de concentration c constante, sur ce diagramme, décrit le mouvement d'un interface entre les dispersions de concentrations c et $c + dc$; donc sa pente en chaque point est égale à $V(c)$.

Comme par définition le long de cette courbe c est constante, $V(c)$ sera également une constante, et une telle courbe sera nécessairement une droite.

Considérons une expérience de sédimentation effectuée dans un récipient quelconque, et supposons que la concentration initiale en particules soit uniforme: $c = c_0 =$ constante. Comme la vitesse de chute v d'une particule ne dépend que de c , le début de la courbe de chute sera tel que $v = cte$; ce sera donc une portion de droite AB. Mais dès le début de la sédimentation, des particules vont s'accumuler au fond du récipient, provoquant ainsi une augmentation de la concentration en particules, qui va se propager de bas en haut avec la vitesse $V(c)$.

Cette variation de concentration rencontrera, à l'instant t_B , la surface correspondant à la chute des particules qui se trouvaient initialement à la partie supérieure de la suspension. Il en résulte qu'au-delà du temps t_B , la concentration locale c augmente, ce qui va modifier la loi de chute des particules situées à la partie supérieure de la suspension.

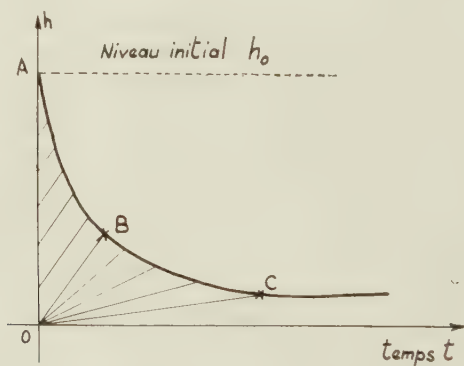
Si $V(c)$ est une fonction croissante de c , de faibles variations de concentration partant des zones plus denses en dessous se propagent plus vite de bas en haut que celles des zones supérieures moins denses, et les dépassent. Le gradient de concentration augmente jusqu'à la formation

d'une discontinuité (premier mode de sédimentation décrit par COE et CLEVENGER). Dans ce cas, nous observerons donc la formation d'un interface entre le liquide clair et la suspension, ainsi que la formation d'une couche de sédiment sur le fond du récipient. L'interface se déplace vers le bas à taux constant jusqu'à l'instant t_B , et au-delà sa vitesse de chute diminue lorsqu'il se rapproche du sédiment.

La courbe de chute du niveau supérieur de la suspension en fonction du temps aura l'allure ci-contre.

Elle comporte une partie rectiligne AB. Dans la région AOB, les droites de concentration constante qui ont pour pente $V(c)$ seront des droites parallèles à OB. A partir du point B, la concentration c_0 augmente jusqu'à c_m . $V(c)$ diminue alors, et les courbes de concentration constante forment un faisceau de droites compris entre OB et OC. Après le point C, la suspension ne se déplace plus, sauf par tassement de la couche de concentration maximum (tassement du sédiment).

En résumé, l'analyse du mécanisme suivant lequel s'effectue la sédimentation montre que la chute de la surface



supérieure de la suspension jusqu'au point B est *uniquement* déterminée par les conditions initiales (concentration initiale), tandis que la chute le long de BC est déterminée

à la fois par les conditions initiales et par les conditions finales pour $h = 0$, c'est-à-dire la position du fond du récipient.

Dans le cas où $V(c)$ est une fonction décroissante de c , il ne se forme pas de discontinuité (deuxième mode de sédimentation décrit par COE et CLEVENGER).

TALMAGE et FITCH (16) ont montré tout l'intérêt de cette théorie, qui permet de substituer une méthode rigoureuse à la méthode semi-empirique du calcul des décan-teurs, méthode qui ne tenait compte que de la partie linéaire de la courbe $h = f(t)$. La nouvelle méthode de calcul est fondée sur l'étude de la courbe donnant la vitesse de sédimentation des particules en fonction de la concentration en particules. Cette méthode fut encore améliorée par SHANNON et TORY et par HASSET (17, 18).

II. — Résultats expérimentaux

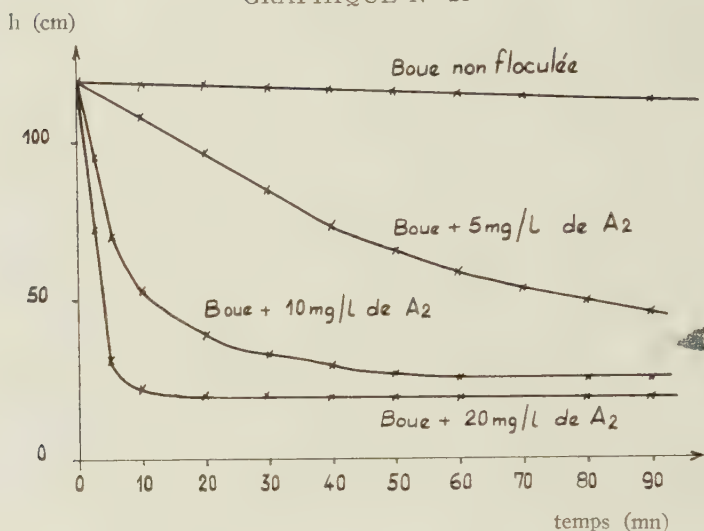
Nous avons effectué des essais de décantation avec de la boue de lavoir à charbon, qui est la seule à décan-ter avec formation d'une surface de séparation nette entre une phase fluide contenant pratiquement toutes les parti-cules de la suspension, et le liquide clarifié surnageant.

Nous avons opéré dans des tubes de verre de 1,20 m de hauteur utile et de 6 cm de diamètre, cette dimension étant considérée comme suffisante pour que les effets de paroi soient négligeables.

La concentration initiale de la suspension était de 55 g/litre. Nous avons effectué des essais avec de la boue non floculée, puis en utilisant de nombreux flocculants à différentes doses. Nous avons tracé les courbes $h = f(t)$ correspondant à chaque essai.

Les courbes obtenues en effectuant un essai avec la boue brute, puis avec cette même boue additionnée de dif-férentes doses d'un même flocculant organique, ont l'allure ci-dessous (graphique n° 21).

GRAPHIQUE N° 21



Dans les cas où il n'y a pas de flocculation, ou si la flocculation se fait mal, les courbes correspondantes se réduisent à un segment de droite AB pour toute la durée de l'expérience.

Pour chaque essai, nous avons calculé v_0 , vitesse de décantation initiale de la suspension, qui est égale à la valeur absolue de la pente du segment AB; les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau suivant.

Valeur de v_0 (cm/minute)

Floculant utilisé	Dose de floculant ajoutée, mg/l		
	5	10	20
C_1	0,30	0,47	0,80
C_2	0,19	0,31	0,19
C_3	0,33	0,50	0,49
N_1	1,55	1,68	3,34
N_2	1,43	2,95	4,5
N_3	2,79	2,0	non mesurable (trop grande)
N_4	1,67	2,03	—d°—
A_1	0,81	0,96	1,13
A_2	1,23	9,68	18,40
A_3	0,80	1,12	1,15

Nous avons remarqué l'efficacité particulière des polymères de type N (non ioniques), ainsi que l'efficacité tout à fait remarquable du polyélectrolyte anionique A₂ qui, à la dose de 20 mg/litre, multiplie la vitesse initiale de décantation par 185, la vitesse de décantation initiale de la boue non floculée étant $v_0 = 0,095$ cm/min.

III. — Interprétation des résultats expérimentaux dans le cadre de la théorie de KYNCH

Il nous a paru intéressant d'étudier la variation de la vitesse de chute d'une particule en fonction de la concentration locale.

Examinons comment la théorie de KYNCH permet de tracer les courbes $v = f(c)$ à partir des expériences de sédimentation réalisées (étude effectuée par TALMAGE et FITCH).

Nous avons vu précédemment que sur le diagramme $h = f(t)$, les courbes de concentration constante étaient des droites d'équation :

$$h = V(c).t$$

La vitesse du ménisque de la suspension est donnée en chaque point par la pente de la tangente à la courbe $h = f(t)$, donc

$$\frac{dh}{dt} = -v(c) \dots\dots\dots (2)$$

D'autre part, lorsqu'une zone de concentration constante monte du fond du récipient jusqu'à la surface, elle est traversée par toutes les particules de la suspension. Si la suspension contient N particules, nous avons

$$N = (v + V).ct \dots\dots\dots (3)$$

En combinant les équations (1), (2) et (3), nous obtenons :

$$\frac{N}{c} = h - \frac{dh}{dt} \cdot t \dots\dots\dots (4)$$

Le terme $h \frac{dh}{dt} \cdot t$ est obtenu graphiquement à partir

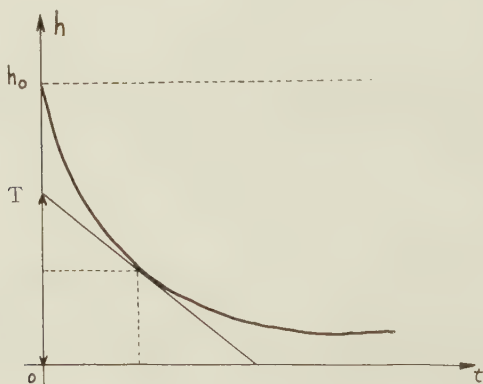
de la courbe $h = f(t)$:

$$\overline{OT} = h - \frac{dh}{dt} \cdot t.$$

Si l'on considère une colonne de section unitaire,

$$N = c_o h_o, \text{ et } \frac{N}{c} = \frac{c_o h_o}{c}$$

cette expression étant sans dimension du point de vue de c , nous exprimerons les concentrations en grammes/litre. Connaissant c_o et h_o , nous déterminerons c en chaque point par l'expression (4), et v en mesurant en chaque point la pente de la tangente à la courbe $h = f(t)$.

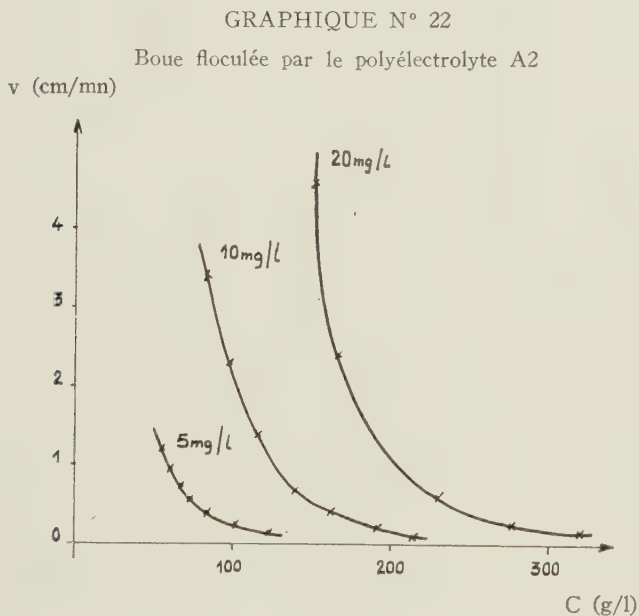


Toutes les courbes obtenues sont décroissantes et présentent l'allure ci-dessous (graphique n° 22):

La comparaison de ces courbes permet de déterminer d'une façon certaine le type de polymère organique le plus

efficace, et la dose nécessaire pour obtenir le résultat voulu.

Nous avons essayé d'expliciter la relation correspondant à l'hypothèse de KYNCH, en cherchant si une fonction simple pouvait rendre compte des variations des valeurs de v en fonction de c . Pour cela, nous avons tracé les courbes



$v = f(c)$ sur papier logarithmique (graphiques n° 23, 24, 25). Ces courbes sont représentées aux pages suivantes. Nous constatons qu'aux erreurs expérimentales près, nous pouvons les assimiler à des droites parallèles.

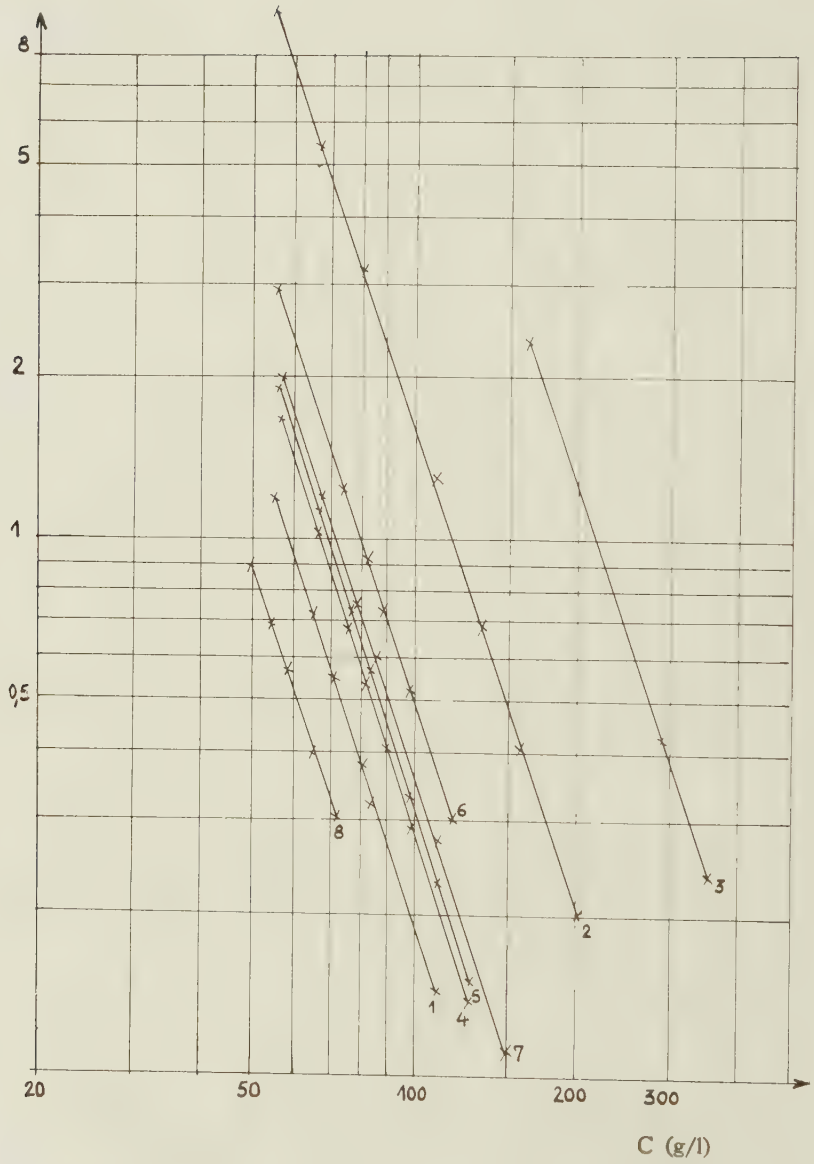
La relation cherchée est donc de la forme $v = kc^\alpha$, et

$$\log v = \log k + \alpha \log c.$$

La pente des droites tracées doit donc être égale à α . La moyenne des valeurs de α mesurées à partir des 20 droites expérimentales est très voisine de — 3. Dans le

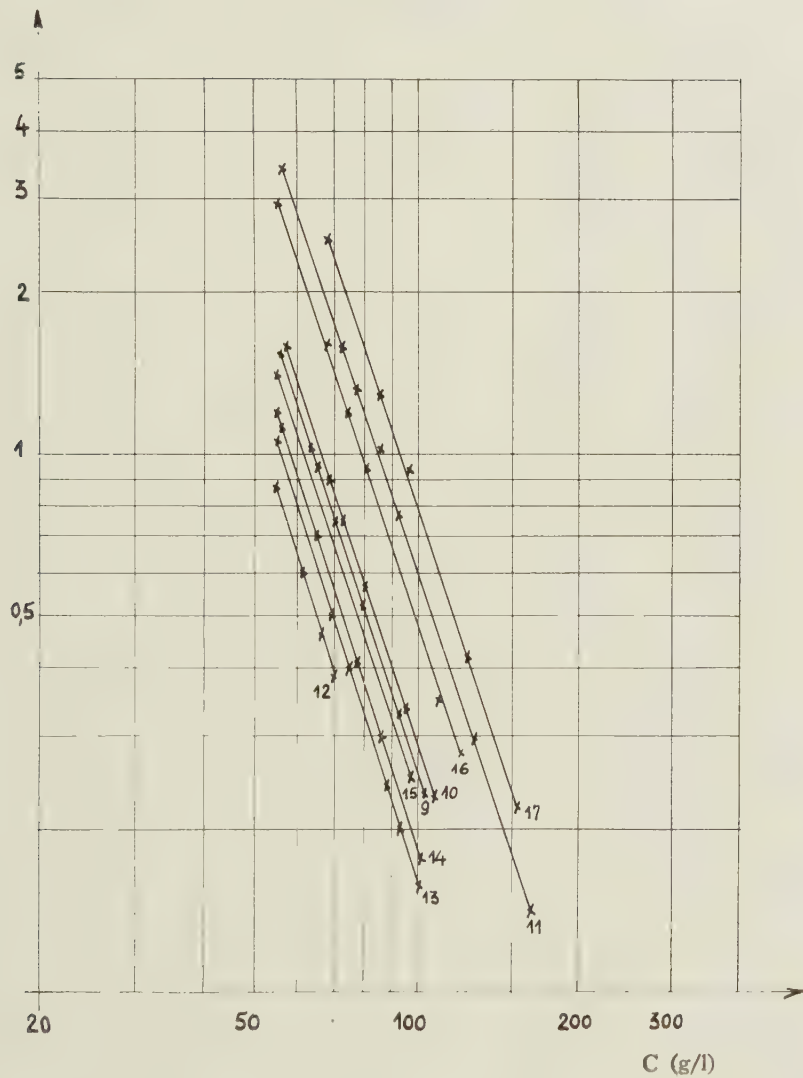
GRAPHIQUE N° 23

v (cm/mn)



GRAPHIQUE N° 24

v (cm/mm)

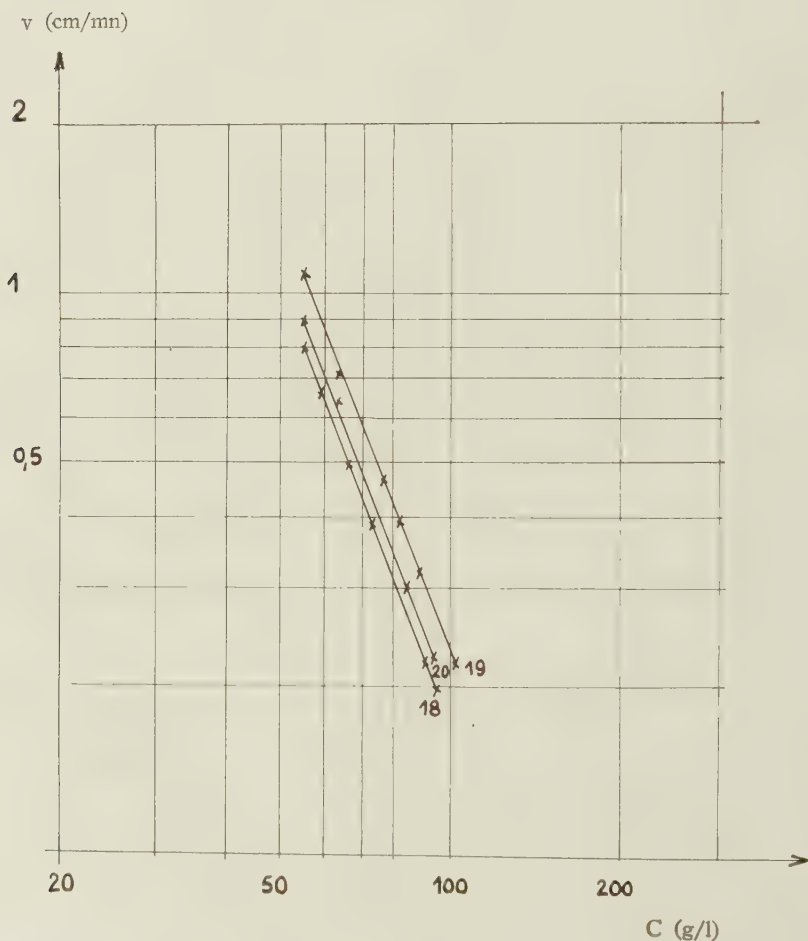


cas particulier de la suspension étudiée, l'hypothèse fondamentale de KYNCH peut donc s'exprimer sous la forme :

$$v \propto kc^{-3}.$$

La valeur de k apparaît comme une mesure du degré de floculation de la suspension, et le tableau ci-dessous, donnant les valeurs de k calculées pour chaque essai, permet de comparer *quantitativement* l'efficacité des flocu-

GRAPHIQUE N° 25



lants utilisés, alors que le simple examen des courbes $v = f(c)$ ne permet qu'une comparaison qualitative.

$$k \text{ s'exprime en } \left(\frac{\text{grammes}}{\text{litre}} \right)^3 \cdot \frac{\text{cm}}{\text{min.}}$$

Valeurs de k

Floculant utilisé	Dose de floculant ajoutée, mg/l		
	5	10	20
C ₁	50 . 10 ³	78 . 10 ³	133 . 10 ³
C ₂	32 . 10 ³	51,6 . 10 ³	32 . 10 ³
C ₃	55 . 10 ³	88 . 10 ³	88 . 10 ³
N ₁	265 . 10 ³	285 . 10 ³	620 . 10 ³
N ₂	230 . 10 ³	510 . 10 ³	780 . 10 ³
N ₃	530 . 10 ³	370 . 10 ³	—
N ₄	270 . 10 ³	330 . 10 ³	—
A ₁	135 . 10 ³	180 . 10 ³	190 . 10 ³
A ₂	206 . 10 ³	1750 . 10 ³	7000 . 10 ³
A ₃	144 . 10 ³	195 . 10 ³	192 . 10 ³
Boue non floculée: k = 15,8 . 10 ³			

Références des courbes $v = f(c)$

N° des courbes	Floculant utilisé	Dose mg/l	N° des courbes	Floculant utilisé	Dose mg/l
—	—	—	—	—	—
1	A ₂	5	11	N ₁	20
2	A ₂	10	12	A ₁	5
3	A ₂	20	13	A ₁	10
4	N ₄	5	14	A ₁	20
5	N ₄	10	15	N ₂	5
6	N ₃	5	16	N ₂	10
7	N ₃	10	17	N ₂	20
8	C ₁	20	18	A ₃	5
9	N ₁	5	19	A ₃	10
10	N ₁	10	20	A ₃	20

En conclusion, ces essais nous ont permis de vérifier la validité de la théorie de KYNCH, qui avait déjà été confirmée par les travaux de SHANNON, de HAAS, STROUPE et TORY (18) sur des suspensions de sphères rigides, et par EDELINE sur des boues résiduaires.

De plus, nous avons explicité la relation correspondant à l'hypothèse fondamentale de KYNCH dans ce cas particulier, et nous avons montré que des essais de décantation statique, réalisés sur des boues floculées par n'importe quel type de polyélectrolyte ou de polymère, nous permettent d'apprécier quantitativement l'action de ces flocculants dans le cas de boues qui décantent avec formation d'une surface de séparation bien nette entre deux phases distinctes. Nous n'avons pu effectuer des essais du même type sur les boues d'eaux de lavage de gaz de hauts-fourneaux qui ne remplissent pas cette condition, ni sur les boues digérées de stations d'épuration, qui, même floculées, ne décantent pas statiquement.

CHAPITRE V

APPLICATION DES TRAITEMENTS DE FLOCULATION A LA CENTRIFUGATION DES BOUES RESIDUAIRES

Nous venons de voir au chapitre précédent que la loi de STOKES n'était pas valable dans le cas de suspensions présentant une haute concentration en solides. Or, ce sont justement des suspensions de ce type que traitent les centrifugeuses industrielles analogues à celle que nous avons utilisée au cours de nos essais.

Le calcul classique effectué par AMBLER (20), qui consiste à déterminer la taille minimale des particules qui seront retenues, et, par conséquent, le rendement de la centrifugeuse, connaissant le débit admis, le champ de forces qui règne dans la machine, et la géométrie de celle-ci, en utilisant la loi de STOKES, ne peut être valable, puisqu'aucune particule de la suspension ne se déplace indépendamment des autres. D'autre part, la présence d'un râcleur hélicoïdal, tournant à une vitesse relativement importante à l'intérieur du bol, provoque des turbulences, ce qui constitue une raison supplémentaire de ne pas utiliser la loi de STOKES.

L'écart entre les résultats expérimentaux et les prévisions théoriques a conduit plusieurs auteurs, en particulier

FRAMPTON (21), à évaluer les performances des centrifugeuses industrielles en introduisant des facteurs empiriques qu'on peut uniquement évaluer par des observations expérimentales. Cette méthode consiste à remplacer, dans le calcul classique, le rayon du bol par un autre rayon, en tenant compte de l'épaisseur du sédiment, la longueur du bol par une longueur fictive plus petite tenant compte des effets perturbateurs dus aux extrémités, à tenir compte du volume du racleur, et à appliquer un facteur corrigeant la turbulence due au raclage et le mouvement en spirale du liquide. Cependant, toutes ces corrections ne tiennent pas compte de la principale cause d'erreurs, qui est l'application de la loi de STOKES. Aussi, nous pensons que l'utilité des formules ainsi établies est limitée aux comparaisons théoriques entre machines de même type et de même configuration, mais de tailles différentes.

La théorie de la centrifugation ne permet donc pas actuellement de déterminer exactement les valeurs de deux paramètres particulièrement intéressants en fonction des conditions d'exploitation d'une centrifugeuse industrielle :

l'humidité du sédiment obtenu après centrifugation,
la quantité de matières en suspension du centrifugat.

Nous avons donc déterminé expérimentalement ces grandeurs pour chacun des types de boue que nous avons à traiter.

I. — Matériel utilisé

Nous avons utilisé pour nos essais une centrifugeuse semi-industrielle GUINARD type D 16, fonctionnant en continu.

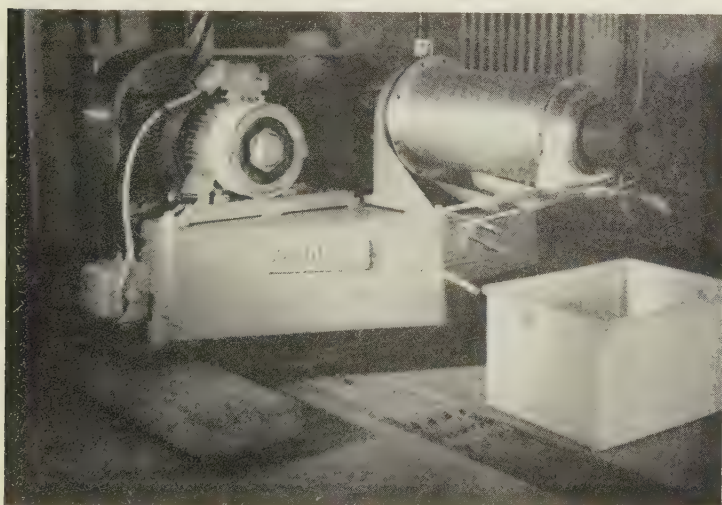
Cette machine est essentiellement composée :

d'un bol cylindrique ayant 16 cm de longueur et 16 cm de diamètre,

d'une partie conique prolongeant le bol et destinée à l'essorage du sédiment,

L'ensemble cylindro-conique peut tourner à une vitesse absolue de 4 000, 5 000 et 6 000 t/min, suivant la combinaison de poulies le reliant à un moteur électrique de 4 CV.

Une vis racleuse hélicoïdale tourne à l'intérieur du bol à une vitesse relative variant entre 60 et 90 t/mn., afin de racler le sédiment et d'évacuer celui-ci, le liquide clarifié étant évacué par débordement.



Le débit maximum admissible est de $1 \text{ m}^3/\text{h}$. Le débit effectivement admis est plus faible et varie de 0,250 à $0,750 \text{ m}^3/\text{h}$, suivant la concentration en matières solides de la suspension traitée.

La centrifugeuse est alimentée par une pompe comportant un rotor en néoprène, dont le débit est réglable à l'aide d'une vanne. Dans le cas de la centrifugation de boues floculées, la floculation a été réalisée directement dans un gros entonnoir à l'entrée de la centrifugeuse, pour éviter de briser dans la pompe les flocons formés. La suspension à traiter est maintenue homogène dans un bac à l'aide d'un agitateur mû par un moteur électrique.

II. — Centrifugation de boues de lavoir à charbon

Résultats expérimentaux

Nous avons déterminé les performances de notre machine en fonction :

- du débit de fonctionnement,
- de la vitesse absolue de rotation du bol,
- de la concentration en matières solides de la boue à traiter,
- de l'utilisation ou non de flocculants de type C, N ou A.

A. — INFLUENCE DU DÉBIT ADMIS

Nous avons effectué 18 séries d'essais à concentration en solides constante, en utilisant des boues de lavoir à charbon plus ou moins flocculées, avec des vitesses de 4 000, 5 000 et 6 000 t/mn. Chaque série d'essais était effectuée à la même vitesse, et comportait 3 essais qui ne différaient que par le débit utilisé : 0,250, 0,500 et 0,750 m³/heure.

Dans tous les cas, le rendement était d'autant meilleur que le débit de fonctionnement était faible. La plus grande variation enregistrée était une diminution du rendement de 30 % de sa valeur, pour un débit variant du simple au triple. Ce résultat s'explique par le fait qu'à débit plus faible correspond une durée de rétention du fluide dans le bol plus grande, et qu'il y a davantage de particules qui ont le temps de se déposer sur la paroi du bol.

Au cours de 16 séries d'essais, l'humidité du sédiment obtenu était d'autant plus faible que le débit était élevé, mais elle variait au maximum de 10 % de sa valeur pour un débit d'alimentation variant du simple au triple. Dans les deux autres séries d'essais, l'humidité était pratiquement stationnaire. Nous pensons que les résultats précédents s'expliquent par le fait que quand le débit est faible, la machine retient un grand nombre de particules essentiellement de nature argileuse, et que ces particules fixent davantage d'eau que les particules de charbon plus grosses,

B. — INFLUENCE DE LA VITESSE ABSOLUE DE ROTATION DU BOL

Dans le but d'étudier l'influence de la vitesse de rotation du bol et l'influence de la concentration en matières solides de la suspension à traiter, nous avons effectué des séries d'essais de centrifugation de la boue non floculée à différentes concentrations, avec successivement des vitesses de rotation de 4 000, 5 000 et 6 000 t/mn au débit de 750 litres/heure.

Les résultats obtenus ont été transcrits sous forme de courbes donnant le rendement de la centrifugation ou l'humidité du sédiment obtenu en fonction de la concentration en matières solides, à chaque vitesse utilisée.

Ces courbes sont présentées à la page suivante (graphiques n° 26 et 27).

Pour la centrifugeuse utilisée, nous avons calculé les équivalences suivantes entre la vitesse de rotation du bol et l'accélération centrifuge appliquée:

4 000 t/mn		1 420 g
5 000 »		2 200 g
6 000 »		3 200 g

L'influence de la vitesse de rotation du bol sur les deux grandeurs étudiées est très nette:

L'humidité du sédiment est d'autant plus faible que la vitesse de rotation du bol est élevée. Nous expliquons cette variation par l'action purement mécanique des forces centrifuges qui tendent à tasser le sédiment, et par conséquent à en diminuer l'humidité.

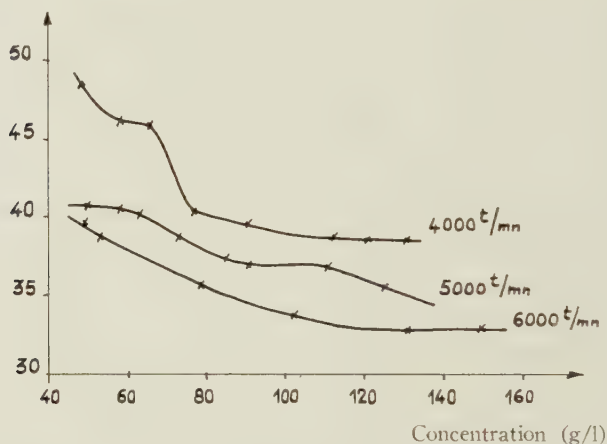
Le rendement de la centrifugation (pourcentage pondéral de matières solides retenues) est d'autant plus élevé que la vitesse de rotation du bol est élevée. Pour un débit identique, donc pour une même durée de rétention, la quantité de particules retenues sera d'autant plus grande que les particules se sédimenteront plus rapidement parce que soumises à une force centrifuge plus élevée.

En vue de confirmer ces résultats, nous avons effectué une série d'essais à concentration en solides constante, sur

des boues floculées par les trois types de polymères: anionique, cationique et non ionique. Nous avons constaté que l'humidité du sédiment ne variait pratiquement pas avec la vitesse de rotation du bol, ce qui nous semble dû au fait que les flocons emprisonnent fortement une certaine quantité d'eau. Quant au rendement, il augmentait de 3 à 12 % de sa valeur suivant les cas.

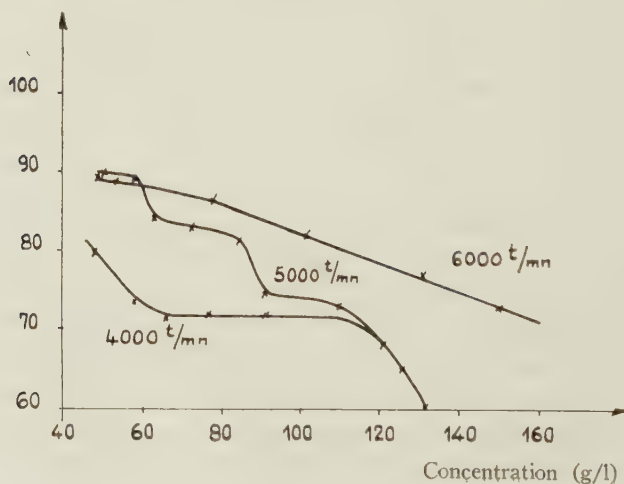
GRAPHIQUE N° 26

Humidité du sédiment (%)



GRAPHIQUE N° 27

Rendement %



En conséquence, dans le cas d'une boue de lavoir à charbon, il nous paraît préférable d'utiliser la vitesse de rotation du bol la plus élevée: 6 000 t/mn (3 200 g).

C. — INFLUENCE DE LA CONCENTRATION EN SOLIDES DE LA BOUE A TRAITER

La comparaison des deux séries de courbes de la page 5 nous montre que:

L'humidité du sédiment décroît quand la concentration de la suspension augmente. Pour une variation de concentration de 50 à 130 g/litre, l'humidité du sédiment décroît de:

20 %	de sa valeur à 4 000 t/mn.
12,5 %	— à 5 000 t/mn. et
20 %	— à 6 000 t/mn.

Donc, en partant d'un produit plus sec, on aboutit à un sédiment plus sec.

Le rendement de la centrifugation décroît quand la concentration de la suspension augmente. Cela s'explique aisément: nous avons vu au chapitre précédent que la vitesse de chute d'une particule est inversement proportionnelle à la 3^e puissance de la concentration locale. Pour un débit égal, donc un temps de rétention égal, il y aura d'autant plus de particules retenues qu'elles se sédimenteront rapidement, c'est-à-dire que la concentration en particules sera faible.

D. — INFLUENCE DE L'UTILISATION DE FLOCULANTS

Nous avons effectué une série d'essais aux vitesses de 4 000, 5 000 et 6 000 t/mn, au débit de 0,750 m³/heure, sur les trois types de boues suivants:

- Boue de lavoir à charbon non floculée,
- Boue floculée par le polymère non ionique N₄,
- Boue floculée par le polyélectrolyte C₁.

Ces boues contenaient 50 g/litre de matières sèches.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau suivant.

Vitesse t/min.		Boue non floclée	Boue + N ₄	Boue + C ₁
—		—	—	—
4 000	Humidité du sédiment ...	48 %	52,9 %	41,1 %
	Rendement %	79,5	78,0	74,2
5 000	Humidité du sédiment ...	40,7 %	40,8 %	43,5 %
	Rendement %	89,6	87,0	73,3
6 000	Humidité du sédiment ...	39,5 %	40,9 %	41,8 %
	Rendement %	89,6	89,9	90,3

Ce tableau nous montre que l'utilisation de floclants organiques conduit généralement à un sédiment plus humide, et que le rendement de la centrifugation diminue ou reste stationnaire dans le cas le plus favorable.

En conclusion, l'utilisation de ces floclants préalablement à la centrifugation ne se justifie pas dans le cas d'une boue de lavoir à charbon, contrairement à ce qui était le cas pour la décantation.

L'ensemble des résultats obtenus nous montre que les conditions d'exploitation les meilleures sont:

Débit: 0,750 m³/heure,
Vitesse absolue du bol: 6 000 t/mn,
Vitesse relative du racleur: 89 t/mn,
Concentration en solides de la boue: 50 à 80 g/l,
Pas d'utilisation de floclants.

Dans ces conditions, nous pouvons nous attendre aux performances suivantes:

Humidité du sédiment: 35 à 40 %,
Rendement de la centrifugation: 76 à 87 %.

III. — Centrifugation des boues d'eaux de lavage de gaz de hauts-fourneaux

Nous avons effectué plusieurs séries d'essais aux vitesses de 4 000, 5 000 et 6 000 t/mn avec de la boue non floculée, de la boue floculée par 10 mg/litre de polyélectrolyte cationique C_K, de la boue floculée par 10 mg/l de polymère non ionique N₄; ces boues contenaient 10 à 100 g/l de matières sèches. Pour chaque essai, nous avons mesuré l'humidité du sédiment et calculé le rendement. L'ensemble de tous les résultats obtenus a été présenté sous la forme des courbes tracées ci-dessous.

A. — INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION DU BOL

Il est facile de voir, en superposant les courbes obtenues aux trois vitesses, que pour une suspension floculée ou non, le rendement est d'autant meilleur que la vitesse de rotation est élevée. Il peut atteindre 99 % à 6 000 t/mn pour la boue floculée.

B. — INFLUENCE DE LA CONCENTRATION EN SOLIDES

à 4 000 t/mn (graphique n° 28):

La variation du rendement en fonction de la concentration est irrégulière, en particulier pour la boue floculée par le polymère N₄. Nous pensons que pour certains de ces essais, la floculation s'est mal faite. Ces courbes ne permettent pas de déterminer une tendance générale.

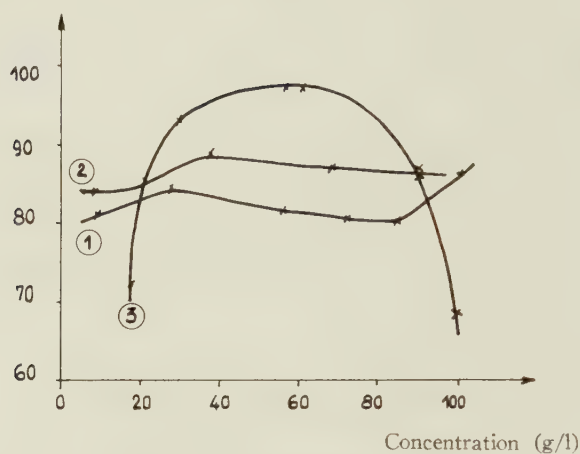
à 5 000 t/mn (graphique n° 29):

Pour la boue non floculée, la courbe passe par un maximum de rendement (90 %) pour une concentration de 40 g/l. Ce serait donc à partir de cette concentration que le phénomène de sédimentation retardée ferait sentir son effet sur le rendement.

GRAPHIQUE N° 28

Rendement %

4 000 t/mn

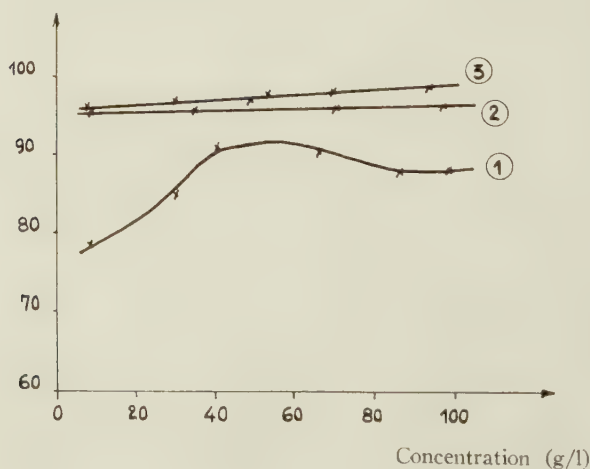


1. Boue brute. — 2. Boue + C₁. — 3. Boue + N₄.

GRAPHIQUE N° 29

Rendement %

5 000 t/mn



1. Boue brute. — 2. Boue + C₁. — 3. Boue + N₄.

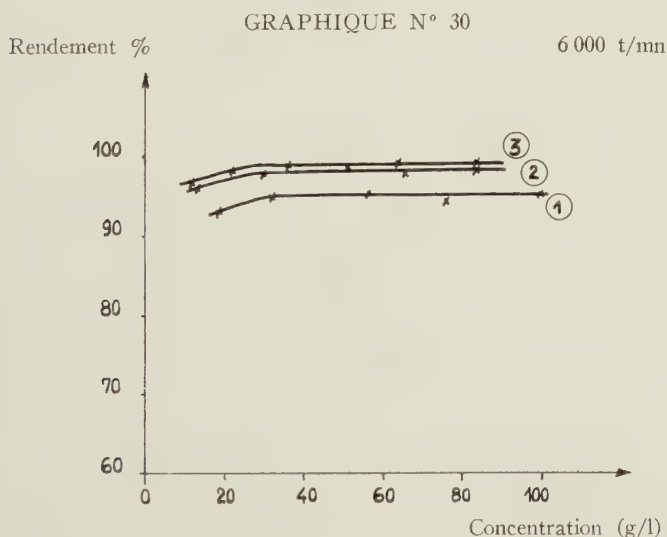
Pour les deux types de boues floclées, le rendement semble pratiquement indépendant de la concentration dans tout l'intervalle compris entre 10 et 100 g/l.

à 6 000 t/mn (graphique n° 30):

Pour la boue brute comme pour les boues floclées, le rendement semble indépendant de la concentration en solides. Tout se passe comme si nous avions atteint la valeur maximum de rendement que permet ce type d'appareil.

C. — INFLUENCE DE L'UTILISATION DE FLOCLANTS

Pour les deux floclants utilisés, et à toutes les vitesses, les rendements sont meilleurs pour une boue floclée que pour la même boue non floclée.



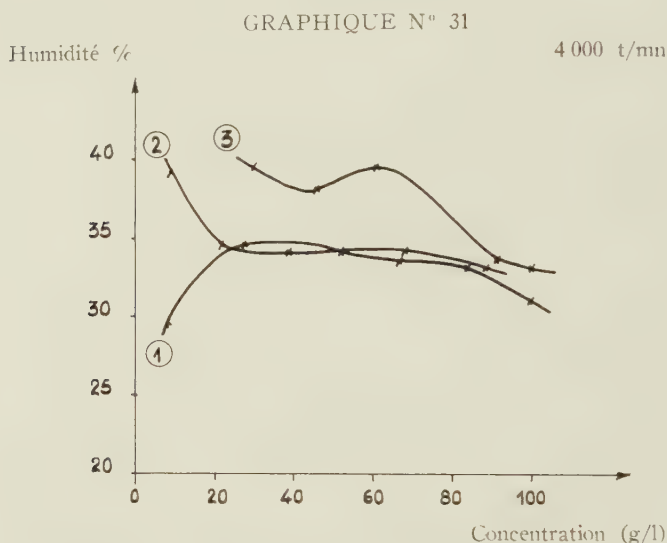
1. Boue brute. — 2. Boue + C₁. — 3. Boue + N₄.

2° VARIATION DE L'HUMIDITE DU SÉDIMENT EN FONCTION DES CONDITIONS D'EXPLOITATION DE LA CENTRIFUGEUSE

Les résultats obtenus sont traduits par la série de courbes figurant ci-après.

A. — INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION DU BOL

En superposant les trois séries de courbes, on s'aperçoit que l'humidité du sédiment diminue pour une vitesse croissante du bol, ou reste stationnaire. Ce résultat confirme donc celui que nous avons obtenu dans le cas de la boue de lavoir à charbon.



1. Boue brute. — 2. Boue + C₁. — 3. Boue + N₁.

B. — INFLUENCE DE LA CONCENTRATION EN SOLIDES

Dans 8 cas sur 9, l'humidité du sédiment obtenu décroît quand la concentration en solides de la boue traitée augmente. Ce qui confirme également les résultats et les hypothèses précédents.

C. — INFLUENCE DE L'UTILISATION DE FLOCCULANTS

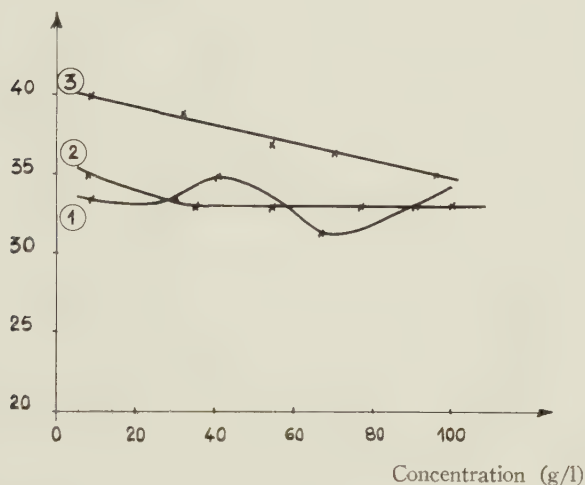
A la vitesse de 4 000 t/mn, l'humidité du sédiment obtenu à partir de boues flocculées est supérieure à celle qui est obtenue avec de la boue brute (graphique n° 31).

Aux vitesses de 5 000 (graphique n° 32) et 6 000 t/mn (graphique n° 33), c'est l'humidité du sédiment obtenu avec la boue brute qui est la plus grande. Nous pensons

GRAPHIQUE N° 32

Humidité du sédiment %

5 000 t/mn



1. Boue brute. — 2. Boue + C₁. — 3. Boue + N₄.

donc que les flocons formés de petites particules, dont il s'agit ici, perdent facilement l'eau qu'ils emmagasinent sous l'effet d'une force centrifuge élevée.

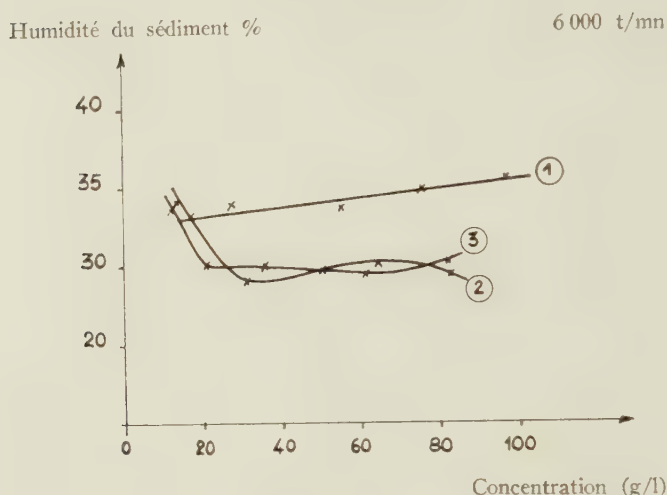
Conclusion.

Dans le cas des boues provenant d'eaux de lavage de gaz de hauts-fourneaux, les meilleures performances seront atteintes en flocculant préalablement la boue par un polymère non ionique ou cationique, en opérant à vitesse élevée: 6 000 t/mn (3 200 g), à un débit de 0,750 m³/h, pour une machine analogue à celle que nous avons utilisée.

Dans ces conditions, nous atteignons un rendement de 98 %, et obtenons un sédiment contenant 30 % d'humidité.

dité en partant d'une boue ayant une concentration comprise entre 50 et 80 g/l.

GRAPHIQUE N° 33



1. Boue brute. — 2. Boue + C₁. — 3. Boue + N₄.

IV. — Centrifugation des boues digérées de station d'épuration d'eaux urbaines

Nous avons effectué des essais de centrifugation aux mêmes vitesses que pour les autres boues, sur deux types de boues digérées de stations d'épuration d'eaux urbaines, qui différaient par leur provenance et leur teneur en matières sèches.

- a) *Boue n° 1*: provenant de la digestion de boues activées dans une fosse Imhoff à deux étages, et ayant une teneur en matières sèches de 65,33 g/l.
- b) *Boue n° 2*: provenant de la digestion de boues activées dans un digesteur séparé et ayant une teneur en matières sèches de 124,3 g/l.

Aucune de ces deux boues ne décantait statiquement. Pour chacun de ces deux types de boue, nous avons effectué les mêmes essais sur :

- la boue non traitée,
- la boue additionnée d'un polyélectrolyte anionique,
- la boue additionnée d'un polyélectrolyte cationique,
- la boue additionnée d'un polymère non ionique,
- la boue additionnée de 120 % de son poids en matières sèches de cendres volantes de centrale thermique.

A. — CENTRIFUGATION DES BOUES NON TRAITEES

a) *Boue n° 1* (débit: 0,320 m³/h).

Vitesse du bol V (t/min.)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
Humidité du sédiment H (%)	75,2	75,2	70,2
Teneur en matières sèches du centrifugat T (%)	3,61	3,17	3,63
Poids de solide sec, P, retenu par m ³ traité (kg)	28,68	34,80	31,03
Rendement R (%)	43,9	53,3	47,5

Nous remarquons l'existence d'un rendement optimum à 5 000 t/mn, et d'un minimum d'humidité du sédiment à 6 000 t/mn.

b) *Boue n° 2* (débit: 0,350 m³/h).

Vitesse du bol V (t/min.)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
Humidité du sédiment H (%)	67,4	62,0	65,2
Teneur en matières sèches du centrifugat T (%)	5,1	6,0	5,45
Poids de solide sec, P, retenu par m ³ traité (kg)	76,20	82,84	67,43
Rendement R (%)	61,3	57,1	56,0

Ici, le maximum d'efficacité est observé à 4 000 t/mn, tandis que le sédiment présente un minimum d'humidité

à 5 000 t/mn. La comparaison de ces deux tableaux nous montre qu'il est intéressant de partir d'une boue bien digérée, épaissie au maximum.

B. — CENTRIFUGATION DES BOUES TRAITÉES
PAR UN FLOCCULANT ANIONIQUE (A₂)

Pour les deux boues, nous avons utilisé le flocculant anionique A₂ à la dose de 8 g de polyélectrolyte par kg de matière sèche contenue dans la boue.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans les deux tableaux suivants.

a) *Boue n° 1* (même débit que précédemment).

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
H (%)	76,3	74,7	71,8
T (%)	3,22	3,16	3,41
P (kg/m ³)	27,01	26,08	23,55
R (%)	41,34	39,90	36,05

b) *Boue n° 2.*

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
H (%)	67,6	62,0	63,8
T (%)	5,50	5,30	5,55
P (kg/m ³)	66,5	83,2	60,5
R (%)	53,5	58,0	50,2

D'une manière générale, les résultats sont moins bons ici que dans le cas des boues non traitées, ce qui s'explique par le fait que ce type de flocculant est incapable de flocculer les boues digérées de stations d'épuration, et qu'il exerce au contraire une action dispersante en accroissant la répulsion électrostatique entre les particules de la boue.

Les humidités du sédiment sont du même ordre de grandeur, tandis que les rendements sont plus faibles.

C. — CENTRIFUGATION DES BOUES TRAITÉES
PAR UN FLOCCULANT NON IONIQUE (N₄)

Les résultats obtenus sont rassemblés dans les tableaux suivants.

La dose de flocculant utilisée était la même que pour le polyélectrolyte A₂.

a) Boue n° 1.

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
H (%)	84,1	80,1	72,7
T (%)	3,11	3,53	3,64
P (kg/m ³)	27,23	23,32	20,70
R (%)	41,7	35,7	31,7

Nous remarquons que pour cette boue, le rendement de la centrifugation décroît lorsque la vitesse de rotation du bol augmente, contrairement à ce qui se passait pour les boues de nature minérale que nous avons traitées précédemment. Nous pensons que les flocons formés sont beaucoup plus fragiles et qu'ils ont d'autant plus tendance à être brisés que la vitesse de rotation du bol est élevée.

b) Boue n° 2.

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
H (%)	72,8	69,4	68,3
T (%)	4,20	4,11	5,03
P (kg/m ³)	80,6	101,3	66,1
R (%)	64,8	70,6	54,9

Contrairement à ce qui se passe pour la boue n° 1, nous remarquons, pour la boue n° 2, un rendement plus grand quand elle est floculée que quand elle n'a pas été traitée. Par contre, le sédiment est davantage humide; il peut augmenter de 10 % de sa valeur.

D. — CENTRIFUGATION DES BOUES TRAITÉES
PAR UN POLYÉLECTROLYTE CATIONIQUE (C₃)

a) *Boue n° 1.*

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
H (%)	79,9	74,7	70,3
T (%)	3,00	3,30	3,72
P (kg/m ³)	29,63	26,06	19,75
R (%)	45,3	39,9	30,2

b) *Boue n° 2.*

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
H (%)	71,0	68,0	68,5
T (%)	3,7	4,2	4,72
P (kg/m ³)	85,8	98,7	71,12
R (%)	69,0	68,8	59,1

Pour ces deux types de boues, le rendement décroît également lorsque la vitesse du bol augmente. A basse vitesse (4 000 t/mn), le rendement est un peu plus grand ici que pour la boue non floculée et la boue traitée par le polymère N₄.

E. — CENTRIFUGATION DES BOUES
ADDITIONNÉES DE CENDRES

a) Boue n° 1.

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
H (%)	47,8	53,1	43,1
T (%)	3,41	3,48	3,85
P (kg/m ³)	115,22	113,66	108,95
R (%)	79,28	78,21	74,97

b) Boue n° 2.

V (t/mn)	4 000	5 000	6 000
	—	—	—
H (%)	52,3	52,1	51,4
T (%)	6,0	5,3	4,8
P (kg/m ³)	150,05	96,76	156,80
R (%)	76,5	67,5	78,4

L'adjonction de cendres volantes de centrale thermique diminue notablement l'humidité du sédiment et augmente le rendement de la centrifugation. Par contre, la teneur en matières sèches du centrifugat est légèrement plus élevée. L'augmentation de rendement provient de l'élimination dans le sédiment de la presque totalité des cendres ajoutées.

Afin de déterminer si la centrifugation s'effectue avec une sélection, ou non, des matières minérales, nous avons effectué des mesures de perte au feu sur le produit obtenu en séchant la boue brute et le centrifugat obtenu à 4 000

t/mn. Puis nous avons fait les mêmes mesures sur la boue additionnée de cendres et sur son centrifugat.

	Perte au feu
	—
Boue brute	53,5 %
Son centrifugat	65,7
Boue + cendres	24,6
Son centrifugat	60,5

Ces résultats nous montrent que la centrifugation s'accompagne d'une sélection d'autant plus importante que la teneur initiale en matières minérales est élevée. Les matières organiques sont entraînées préférentiellement dans le centrifugat, probablement par suite de leur densité plus faible.

Conclusion

Le principal inconvénient de l'utilisation industrielle de la centrifugation, pour le traitement des boues digérées de stations d'épuration, est la teneur élevée du centrifugat en matières en suspension. Par suite de l'existence des phénomènes de sélection, le recyclage du centrifugat ne devra être envisagé qu'avec la plus grande prudence. L'utilisation de polymères organiques ne se justifie pas, même à la vitesse la plus basse, où les résultats sont au mieux équivalents à ceux que nous avons obtenus avec la boue non traitée.

CHAPITRE VI

APPLICATION DES TRAITEMENTS DE FLOCULATION A LA FILTRATION SOUS PRESSION DES BOUES RESIDUAIRES

Afin de comparer le comportement à la filtration de boues résiduelles très diverses, il est nécessaire de déterminer des grandeurs caractéristiques comparables. Ces grandeurs sont la résistance spécifique à la filtration et la compressibilité des gâteaux obtenus, qu'on définit à partir des équations générales de la filtration.

I. — Application des équations générales de la filtration à la détermination des grandeurs caractéristiques

De nombreux auteurs, en particulier RUTH (22), ont constaté que l'écoulement à travers les filtres était toujours laminaire; par conséquent, les équations générales de la filtration dérivent de l'équation de POISEUILLE exprimant le débit instantané par unité de section droite:

$$q = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\eta} \cdot \frac{1}{R}$$

q sera exprimé en cm/seconde,
t en secondes,

η = viscosité du filtrat à la température de filtration, en poises,

A = surface filtrante en cm^2

V = volume de filtrat en cm^3

ΔP = gradient de pression sous lequel est effectuée la filtration, en baryes (1 barye = $1/980.000 \text{ kg/cm}^2$).

Le terme R représente la résistance globale à la filtration par unité de surface. Les résistances de la membrane filtrante et du gâteau étant en série, nous mettrons R sous la forme:

$$R = R_e + R_m.$$

R sera exprimée en cm^{-1} .

R_g sera proportionnelle à la masse de gâteau sec déposée par unité de surface filtrante:

$$R_g = \alpha \frac{M}{A}.$$

Le facteur de proportionnalité α est appelé résistance spécifique du gâteau. Il s'exprime en cm/gramme , et représente la résistance à la filtration d'une quantité de gâteau correspondant à 1 gramme de produit sec, déposée sur 1 cm^2 de surface filtrante.

Or M est proportionnelle à la quantité de filtrat obtenue:

$$M = mV,$$

m étant la masse de gâteau sec (en grammes) déposée par cm^3 de filtrat.

Nous pouvons donc écrire l'équation différentielle générale de la filtration, ainsi qu'elle fut établie par CARMAN (23):

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\eta \left(\frac{\alpha m}{A} V + R_m \right)} \dots \dots \dots (1)$$

L'intégration à pression constante de cette équation nous donne:

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta \alpha m}{2 \Delta P A^2} \cdot A + \frac{\eta R_m}{A \Delta P} \dots \dots \dots (2)$$

Il en résulte que la courbe d'équation $\frac{t}{V} = f(V)$ sera

théoriquement une droite dont la pente permettra de déterminer α , et dont l'ordonnée à l'origine déterminera R_m .

En admettant que la résistance due à la membrane est négligeable devant celle du gâteau, ce qui sera le cas si le gâteau est suffisamment épais, l'équation (1) devient:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P \cdot A}{\eta \alpha m V} \dots\dots\dots (3)$$

Si m est constant, c'est-à-dire si la suspension à filtrer est homogène, posons $k = \frac{A^2}{m}$. L'équation (3) s'écrit alors:

$$V \, dV = k \frac{\Delta P}{\alpha} \, dt,$$

et par intégration à pression constante:

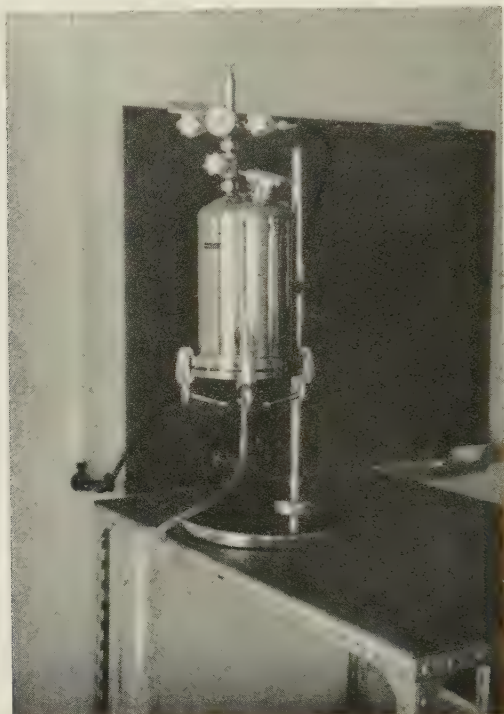
$$V = \sqrt{2 \, k \frac{\Delta P}{\alpha} \cdot t} \dots\dots\dots (4)$$

Or si le gâteau est compressible, α varie avec ΔP , toute augmentation de ΔP diminuant la porosité du gâteau par tassement, et augmentant ainsi sa résistance spécifique à la filtration. Il en résulte qu'un accroissement de ΔP tend, d'une part, à provoquer un accroissement de V suivant la relation (4), et, d'autre part, tend à faire diminuer V en augmentant α dans cette même relation.

II. — Mesures effectuées - Appareillage

Nous avons utilisé un filtre monodisque SEITZ type EF 22/10. Cet appareil permet d'utiliser un disque filtrant de 300 cm², constitué par une toile de tissu nylon ou d'acier inoxydable. Ce filtre comporte un réservoir de 10 litres, dont la partie supérieure est raccordée à une canalisation d'air comprimé. Un manomètre permet d'ajuster la pres-

sion à n'importe quelle valeur comprise entre 0 et 3 kg/cm². Nous utilisons généralement 2 litres de boue par essai.



Le filtrat est recueilli dans une éprouvette graduée de 2 litres. On mesure les volumes de filtrat obtenus à des intervalles de temps réguliers.

Ces résultats nous permettent de tracer les courbes t
— = $f(V)$, de déterminer dans quel domaine elles sont V

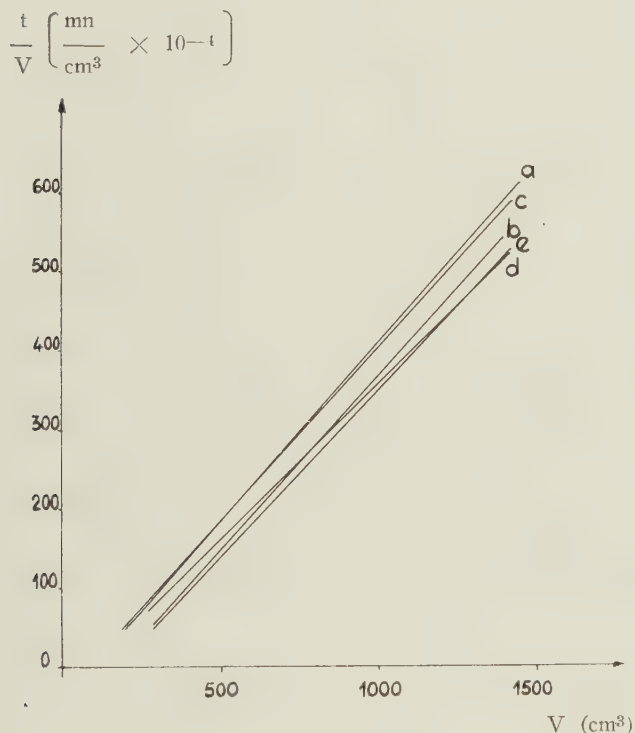
linéaires, de mesurer leurs pentes et de calculer la valeur de α dans ce domaine. A partir d'essais effectués à différentes pressions, nous avons ensuite étudié la loi de variation de la résistance spécifique en fonction du gradient de pression appliqué, pour chaque type de boue étudié.

III. $\Rightarrow$ Résultats expérimentaux

A. — BOUE DE LAVOIR A CHARBON

Nous avons opéré sur de la boue épaissie par décantation, qui contenait 200 g/litre de matières sèches.

GRAPHIQUE N° 34



1. Influence de la nature du milieu filtrant.

Nous avons effectué une série d'essais à un gradient de pression $\Delta P = 1 \text{ kg/cm}^2$ en utilisant diverses toiles filtrantes :

a) toile d'acier inoxydable 18/8, ouvertures de 55 microns,

b) toile d'acier inoxydable 18/8, ouvertures de 104 microns,

c) toile nylon, ouvertures de 50 microns,

d) toile nylon, ouvertures de 76 microns,

e) toile nylon, ouvertures de 104 microns.

Pour chacun de ces essais, nous avons tracé les courbes t

— = $f(V)$. Ces courbes ont l'allure représentée au graphique n° 34 ci-dessus.

Ce sont pratiquement des droites dont les prolongements coupent les axes très près de l'origine. Ce résultat classique est conforme à l'équation de CARMAN intégrée à pression constante (relation 2). Des résultats analogues ont été obtenus par de nombreux expérimentateurs, en particulier CARMAN, RUTH et SPERRY (24). Il en résulte que le terme R_m est petit devant R_s . Dans la majorité des cas, par suite de l'incertitude qui existe sur la détermination de l'instant initial, l'interpolation des droites conduirait à une valeur légèrement négative de R_m .

Les pentes de ces droites, qui sont voisines, permettent de calculer les valeurs de la résistance spécifique à la filtration pour chaque essai. Ces valeurs sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Essais	α (en 10^9 cm/g)
a	203
b	202
c	208
d	196
e	212

Dans le cas présent, nous pouvons donc dire à 5 % près que la résistance spécifique du gâteau est indépendante de la nature et des caractéristiques du tissu filtrant sur lequel s'est formé le gâteau, et que la structure de celui-ci n'a pas varié au cours des 90 minutes de filtration.

Ces essais montrent qu'au bout d'un temps très court, c'est le gâteau lui-même qui joue le rôle de milieu filtrant, et que sa structure impose la vitesse de filtration. La toile filtrante n'intervient dans le phénomène qu'au stade initial pendant lequel se forment les premières couches du gâteau. Cette constatation nous a conduit à orienter notre recherche vers l'étude des propriétés des gâteaux de filtration, et des modifications qu'on peut leur faire subir, plutôt que vers l'étude des propriétés des toiles filtrantes.

2. Influence du gradient de pression appliqué.

Nous avons effectué une série d'essais de filtration de la même boue que précédemment, sur toile en acier inoxydable d'ouverture 35 microns (ouverture minimum disponible), en utilisant les pressions suivantes: 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 et 3 kg/cm².

L'ensemble des courbes tracées à l'aide des résultats obtenus se trouve à la page suivante (graphique n° 35).

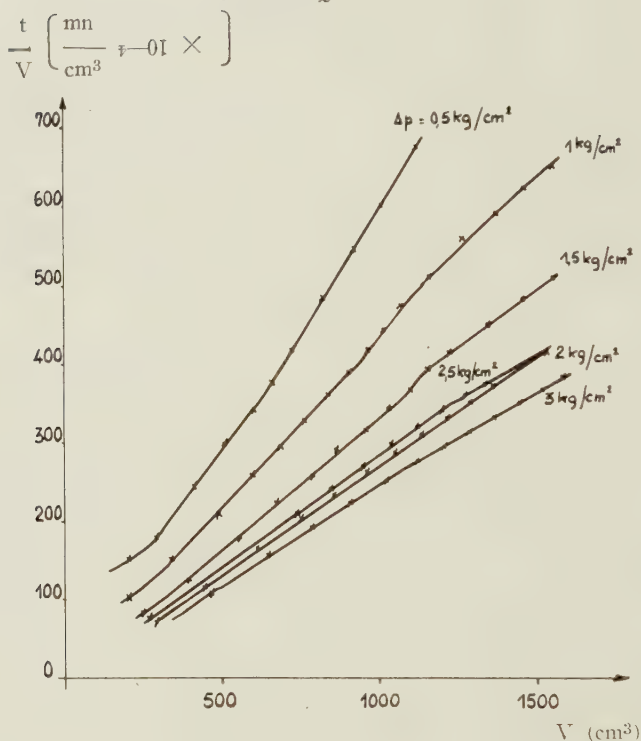
Les six courbes obtenues ont encore une allure linéaire; elles ont cependant une légère tendance à s'infléchir au début et à la fin de la filtration.

Nous pensons que ce phénomène est dû à la décantation de la suspension dans la chambre du filtre.

A partir de cette représentation graphique, nous avons calculé pour chaque essai les valeurs de α , R_g et R_m . Elles sont rassemblées dans le tableau suivant.

ΔP (kg/cm ²)	α en 10 ⁹ cm/g	R_m en 10 ⁹ cm ⁻¹	R_g en 10 ⁹ cm ⁻¹
—	—	—	—
0,5	134	7,1	172
1	189	5,3	243
1,5	226	3,5	285
2	253	3,5	295
2,5	334	5,8	394
3	349	7,9	412

GRAPHIQUE N° 35



La comparaison des valeurs numériques de R_m et R_s ci-dessus confirme donc notre remarque précédente au sujet des importances relatives des résistances à la filtration de la toile et du gâteau. Nous sommes donc dans le domaine de validité de la relation (4):

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P}{2 k \frac{\alpha}{a}}} \cdot t$$

qui montre que le volume de filtrat obtenu au bout d'un temps donné est inversement proportionnel à $\sqrt{\alpha}$. Cette constatation nous amène à étudier l'influence des traite-

ments de floculation de la suspension filtrée sur la résistance spécifique des gâteaux de filtration. La variation de α en fonction de ΔP avait été mise en évidence dès 1922 par LEWIS (25), puis CARMAN, GRACE, SPERRY et RUTH.

Si le gâteau était incompressible, il serait possible de vérifier l'équation de CARMAN sous sa forme intégrée, en

traçant les courbes $\frac{t}{V} = f(\Delta P)$ pour différentes valeurs

de V . De telles courbes seraient des hyperboles équilatères si l'on néglige R_m devant R_g . Mais comme le gâteau est compressible, α varie avec ΔP , et les courbes tracées ne nous fournissent pas davantage de renseignements que les courbes $\alpha = f(\Delta P)$.

3. Influence des traitements de floculation.

Nous avons filtré des boues de lavoir à charbon floculées par 5 mg/litre des floculants N_3 , N_4 , A_3 , C_1 et C_3 :

a) D'une part, des essais effectués à la pression de 1 kg/cm², sur des toiles filtrantes de différentes natures et ou-

vertures, nous ont donné des courbes $\frac{t}{V} = f(V)$ qui sont

des droites parallèles, très proches l'une de l'autre, et parfois confondues. Cela prouve que c'est le gâteau qui joue ici le rôle de milieu filtrant.

b) Les essais effectués à six pressions différentes sur chacune des cinq boues floculées, sur une même toile d'acier inoxydable 35 microns, ont donné des séries de courbes ayant une allure tout à fait identique à celles obtenues avec la boue non floculée. Il est donc inutile de les reproduire ici. A partir de leurs pentes, nous avons calculé les résistances spécifiques correspondant à chaque essai.

Les valeurs ainsi obtenues sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Valeurs de α (en 10^9 cm/g)

AP (kg/cm ²)	Floculant utilisé				
	N ₄	N ₈	C ₁	C ₃	A ₃
0,5	91	159,4	236	202	118
1	138,5	193,5	270	255	213
1,5	186	286,4	315	340	258
2	209	315,2	319	292	375
2,5	265	363,7	394	390	387
3	279	377,8	439	457	436

En comparant ces valeurs avec celles des résistances spécifiques à la filtration obtenues avec la boue brute, il est facile de voir que seul le floculant N₄ améliore nettement la filtration sous pression, en faisant diminuer la résistance spécifique du gâteau. Ce résultat montre que ce n'est pas le polymère donnant les plus gros flocons qui est le plus favorable à la filtration. Les performances obtenues dépendent davantage de la tenue mécanique des flocons que de leur taille.

4. Compressibilité des gâteaux de filtration.

Tous les résultats ci-dessus nous montrent que la résistance spécifique α est une fonction du gradient de pression appliqué, ΔP . GRACE, CARMAN, SPERRY, RUTH ont trouvé que dans certains domaines de pression, les résultats expérimentaux étaient approximativement conformes à la relation empirique suivante:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 (\Delta P)^n \dots\dots\dots (5)$$

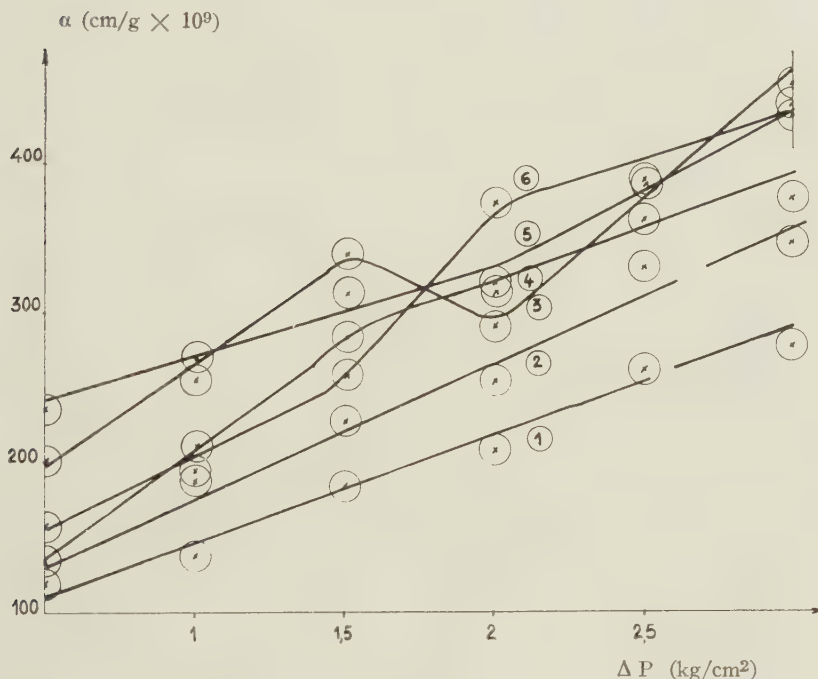
où α_0 et α_1 sont des constantes.

L'exposant n est appelé coefficient de compressibilité du gâteau, et il est d'autant plus grand que celui-ci est compressible.

Afin de voir si une relation de ce type est valable ici, nous avons tracé les courbes $\alpha = f(\Delta P)$.

Ces courbes sont représentées à la page suivante (graphique n° 36).

GRAPHIQUE N° 36



1. Boue + N_4 . — 2. Boue brute. — 3. Boue brute. — 3. Boue + C_3 . — 4. Boue + N_3 . — 5. Boue + C_1 . — 6. Boue + A_3 .

Elles ont une allure *grossièrement* linéaire. Si nous admettons la relation (5), les boues étudiées ont un coefficient de compressibilité très voisin de 1. Dans ce cas, ce sont donc les valeurs de α_0 et α_1 qui permettent de comparer l'intérêt de chacun des traitements de floculation en vue de la filtration.

B. — BOUES DE LAVAGE DE GAZ
DE HAUTS-FOURNEAUX N° 1

Nous avons opéré sur une boue épaissie par décantation, qui contenait, suivant les cas, 15 à 30 grammes de matière sèche par litre.

1. *Influence du gradient de pression appliqué.*

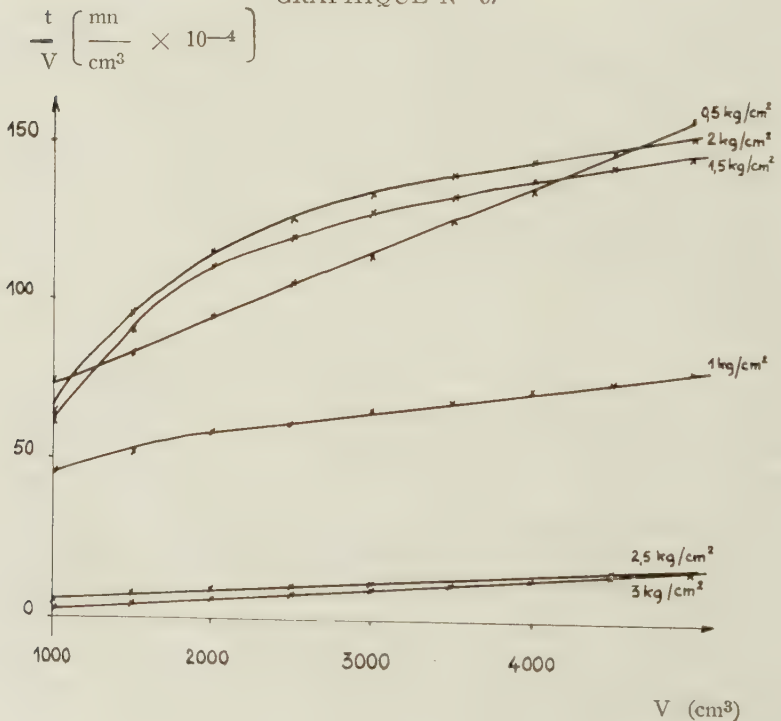
Nous avons effectué une série d'essais sur la boue non floculée, aux pressions suivantes :

0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 et 3 kg/cm²

sur une toile d'acier inoxydable d'ouverture 35 microns.

Les courbes $\frac{t}{V} = f(V)$ tracées pour chaque essai sont représentées au graphique n° 37 (page 110).

GRAPHIQUE N° 37

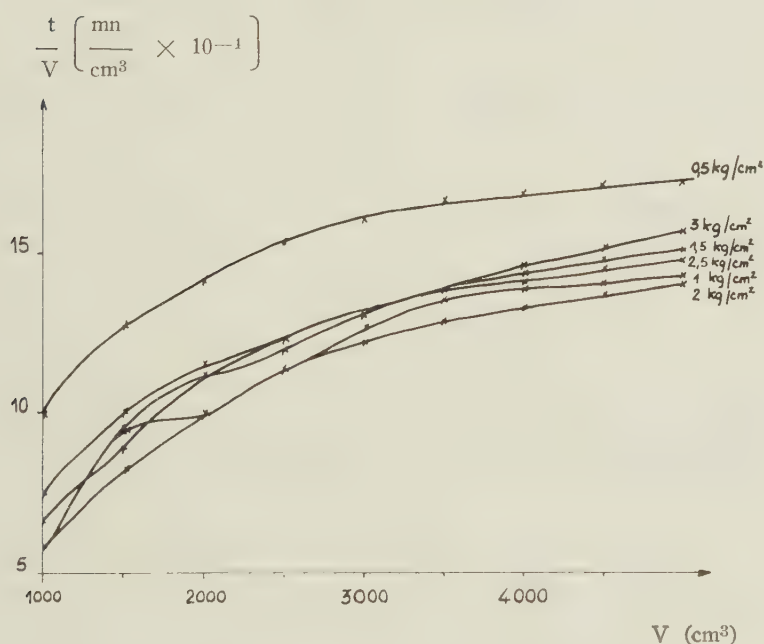


Nous remarquons qu'aux pressions de 1,5 et 2 kg/cm², les courbes présentent d'abord une partie incurvée suivie d'une partie linéaire de pente plus faible.

Les mêmes essais, effectués avec la même boue flocculée par les polymères C₁, C₃, N₃, N₄ et A₃, donnent des courbes

$t = f(V)$ qui ont toutes la même allure. Elles sont représentées ci-contre dans le cas du polyélectrolyte C₃ (graphique n° 38).

GRAPHIQUE N° 38



Nous proposons l'explication suivante de l'allure particulière de ces courbes, qui devraient être théoriquement des droites :

A l'instant initial, la toile filtrante possédant des ouvertures de 35 microns laisse passer une grande partie des

particules, qui ont presque toutes une taille inférieure à cette dimension. Aussi R_m , qu'on détermine en prolongeant le début de la courbe, est relativement faible. Puis, au cours d'un second stade, un certain nombre de particules se coincent dans les angles des mailles de la toile, et la résistance à la filtration de la toile, qui est égale en chaque point à l'ordonnée de l'intersection de la tangente à

la courbe en ce point avec l'axe des $\frac{t}{V}$ augmente progres-

sivement. Finalement, lorsqu'il y a une couche complète de particules déposées sur toute la surface de la toile, c'est cette couche qui joue le rôle de milieu filtrant, la courbe

$\frac{t}{V} = f(V)$ prend une allure linéaire, donc R_m devient cons-

tante et α , qui est proportionnelle à la pente de cette portion de droite, prend une valeur bien définie au cours de la filtration qui suit.

Le rapport $\frac{R_m \text{ finale}}{R_m \text{ initiale}}$ est caractéristique de l'aptitude

de la toile filtrante au colmatage, et il varie beaucoup avec le gradient de pression utilisé. Avec la boue non floculée, nous avons observé la variation suivante:

ΔP (kg/cm ²)		R_{mf}/R_{mi}
—		—
0,5		1
1		1,59
1,5		25
2		50
2,5		1
3		1

Avec une boue floculée, par exemple par le polyélectrolyte C₃, nous avons calculé les valeurs suivantes:

ΔP (kg/cm ²)	R_{mf}/R_{m1}
—	—
0,5	3,49
1	3,53
1,5	4,74
2	10,2
2,5	4,31
3	2,1

L'ensemble de ces résultats nous montre qu'on ne peut plus négliger ici la résistance à la filtration de la toile filtrante plus ou moins colmatée, pendant toute la première partie de la filtration, c'est-à-dire jusqu'à ce que la courbe

$t/V = f(V)$ devienne linéaire. Cette première partie cor-

respond ici à la filtration de 10 cm³ de boue à 30 g/l, par cm² de toile filtrante.

2. Influence des traitements de floculation.

Nous avons effectué des séries d'essais à six pressions différentes, avec la boue non floculée et les cinq types de boues flocuées. Les courbes obtenues nous ont permis d'établir le tableau des valeurs de α .

Valeurs de α (en 10⁹ cm/g)

Floculant utilisé	ΔP (kg/cm ²)					
	0,5	1	1,5	2	2,5	3
—	94,5	185,5	195,2	384	521	945
N ₄	59,2	61,5	64,2	76,1	138,9	322,5
N ₈	10,7	17,7	26,0	28,6	34,2	44,6
C ₁	6,4	10,8	18,3	25,4	35,0	63,7
C ₂	10,9	18,2	32,4	35,3	37,9	42,2
A ₃	8,6	19,6	22,8	29,8	36,8	43,0

D'après les résultats ci-dessus, tous les types de flocculants améliorent la filtration sous pression d'une façon importante.

Ce tableau nous permet de tracer les courbes $\alpha = f(\Delta P)$ pour chaque type de boue, afin d'en étudier la compressibilité.

Ces courbes figurent aux pages suivantes (graphiques n° 39 et 40).

En admettant la relation $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 (\Delta P)^n$, nous avons déterminé le coefficient de compressibilité n .

Pour la boue brute, $n = 2,1$ dans tout l'intervalle de pression étudié.

Pour la boue flocculée par N_3 , $n = 1,08$	} dans tout l'intervalle de pression étudié
» » » C_3 , $n = 0,31$	
» » » A_3 , $n = 1$	

Pour les boues flocculées par N_4 et C_1 , nous avons trouvé que n augmentait avec ΔP . Toutefois, n reste constant dans certains intervalles de pression.

Boue flocculée par N_4 :

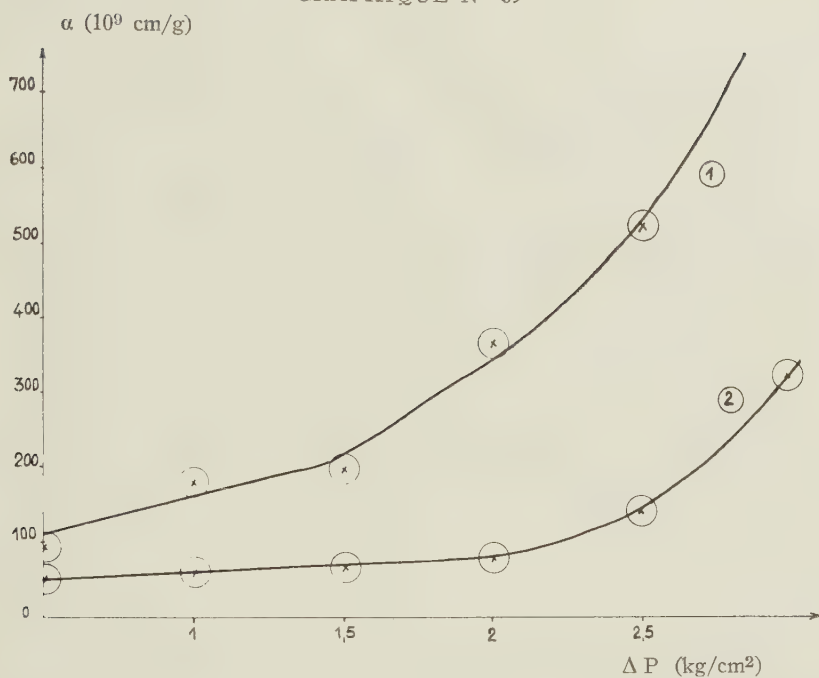
$$\begin{aligned} n &= 1 \text{ pour } 0 < \Delta P < 1,5 \text{ kg/cm}^2 \\ n &= 4,2 \text{ pour } 1,5 < \Delta P < 3 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Boue flocculée par C_1 :

$$\begin{aligned} n &= 1,32 \text{ pour } 0 < \Delta P < 1,5 \text{ kg/cm}^2 \\ n &= 4,32 \text{ pour } 1,5 < \Delta P < 3 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

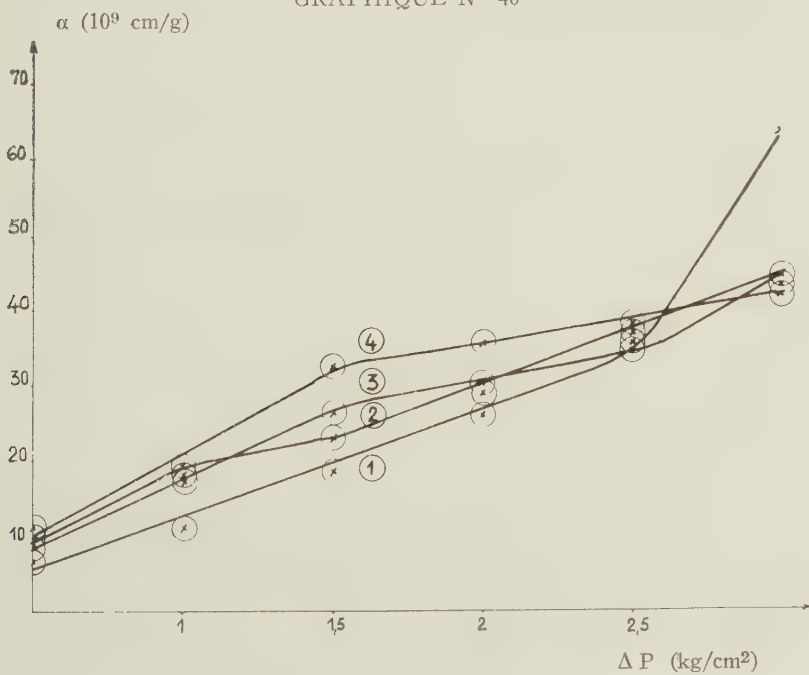
Les valeurs relativement élevées des coefficients de compressibilité de ces boues nous donnent l'opinion qu'il est préférable d'envisager la filtration de ces boues à basse pression (filtration sous vide).

GRAPHIQUE N° 39



1. Boue brute. — 2. Boue + N₄.

GRAPHIQUE N° 40



1. Boue + C₁. — 2. Boue + A₃. — 3. Boue + N₃. — 4. Boue + C₃.

C. — BOUES DE LAVAGE DE GAZ
DE HAUTS-FOURNEAUX N° 2

I. *Influence de la nature du milieu filtrant.*

Nous avons effectué une série de filtration sous une pression $\Delta P = 1 \text{ kg/cm}^2$ sur une série de toiles filtrantes :

- a) toile d'acier inoxydable, ouverture 35 microns
- b) » » » » 50 »
- c) » » » » 104 »
- d) toile nylon, ouverture 50 microns
- e) » » » 76 »
- f) » » » 104 »

Toutes les courbes $\frac{t}{V} = f(V)$ obtenues sont des droites approximativement parallèles, donc α varie peu avec la nature du tissu filtrant. Pour chaque essai, nous avons calculé α , R_m et R_g .

Essais	α	R_m	R_g
—	—	—	—
	(10^9 cm/g)	(10^9 cm^{-1})	(10^9 cm^{-1})
a	7,09	0,35	14,97
b	6,35	0,35	14,97
c	6,61	0,14	15,84
d	6,06	0,14	15,36
e	6,19	0,26	15,47
g	6,32	0,07	15,00

Ce tableau nous confirme que α varie peu avec la nature et l'ouverture de la toile filtrante, et nous montre que l'approximation suivant laquelle R_m est négligeable devant R_g est tout à fait justifiée.

Bien que la majorité des particules ait une taille inférieure à 35 microns, les courbes $\frac{t}{V} = f(V)$ ne présentent pas la forme particulière observée dans le cas précédent. Nous pensons que cela est dû au fait que l'on filtre une boue épaissie par décantation, de concentration beaucoup plus élevée (200 g/l). La formation de la première couche de gâteau sur la surface filtrante se fait très rapidement, donc le stade correspondant à une partie incurvée de la courbe est très court par rapport à la durée de la filtration ultérieure. Nous remarquons que les valeurs de α trouvées sont beaucoup plus faibles que pour la boue de lavoir à charbon.

2. Influence de la pression utilisée.

Nous avons effectué des essais de filtration à six pressions différentes sur la toile d'acier inoxydable de 35 microns, avec de la boue non floculée, puis avec la boue floculée par une dose de 5 mg/l de flocculant N₄. Dans les deux cas, les courbes $\frac{t}{V} = f(V)$ forment des faisceaux de droites, dont les pentes nous ont permis de calculer α pour chaque essai. Les valeurs ainsi obtenues sont rassemblées dans le tableau suivant.

Valeurs de α (en 10⁹ cm/g)

ΔP (en kg/cm ²)	Types de boue	
	Boue brute	Boue + 5 mg/l de N ₄
0,5	4,53	2,07
1	4,65	3,03
1,5	5,72	3,30
2	6,39	3,83
2,5	6,87	4,21
3	7,04	5,04

La floculation par un polymère organique non ionique diminue donc sensiblement la résistance spécifique à la filtration de la boue étudiée, et multiplie donc sa vitesse

moyenne de filtration par le rapport $\sqrt{\frac{\alpha \text{ boue brute}}{\alpha \text{ boue floculée}}}$.

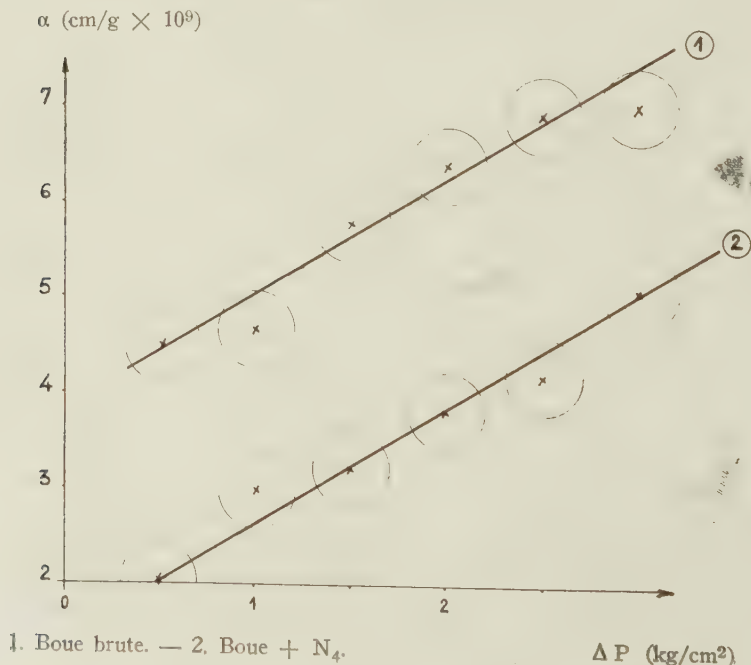
Le tableau ci-dessus permet de tracer les deux courbes $\alpha = f(\Delta P)$ qui nous permettront d'étudier la compressibilité de la boue considérée (graphique n° 41).

Ces deux courbes, qui figurent ci-dessous, ont une allure grossièrement linéaire; il en résulte donc que le coefficient de compressibilité n est égal à 1.

D. — BOUES DIGÉRÉES DE STATIONS D'ÉPURATION

Nous avons effectué un essai de filtration sur la toile d'acier inoxydable de 35 microns, à une pression moyenne $\Delta P = 2 \text{ kg/cm}^2$, avec quatre boues digérées dont voici les caractéristiques:

GRAPHIQUE N° 41



Boue n° 1: provenant de la digestion de boues activées dans un digesteur indépendant. Teneur en matières sèches = 124,3 g/l.

Boue n° 2: provenant de la digestion des boues d'une station à lit bactérien dans une fosse Imhoff à 2 étages. Teneur en matières sèches = 74,5 g/l.

Boue n° 3: provenant de la digestion de boues activées dans un digesteur indépendant. Teneur en matières sèches = 113,8 g/l.

Boue n° 4: provenant de la digestion de boues activées dans un digesteur indépendant. Teneur en matières sèches = 94,7 g/l.

Ces essais furent effectués successivement avec ces boues non traitées, et ces boues floculées par 250 mg/l de polyélectrolyte cationique C₃, qui s'était révélé le plus efficace au cours des essais de floculation. Les courbes $\frac{t}{V} = f(V)$ obtenues avaient une allure linéaire, et leurs pentes nous ont permis de calculer les différentes valeurs de α qui figurent dans le tableau ci-dessous:

Valeurs de α (en 10⁹ cm/g)

Type de boue	Boue brute $\Delta P = 2 \text{ kg/cm}^2$	Boue floculée $\Delta P = 2 \text{ kg/cm}^2$
N° 1	8.910	1.370
N° 2	70.180	3.200
N° 3	boue non filtrable	13.070
N° 4	20.380	910

Nous remarquons que toutes ces boues présentent une résistance spécifique à la filtration extrêmement élevée par rapport aux autres types de boues étudiés jusqu'ici. Nous

constatons également que la floculation par un polyélectrolyte cationique réduit de 6 à 20 fois la résistance spécifique à la filtration α , ce qui multiplie la vitesse de filtration par un facteur compris entre 2,5 et 4,5.

D'autre part, nous constatons que les boues n° 1 et 3, qui ont des provenances identiques et des teneurs en matières sèches du même ordre de grandeur, ont des résistances spécifiques à la filtration très différentes. Nous pensons que cette différence de comportement provient des différences de qualité de la digestion subie. Cela est confirmé par le fait que contrairement à la boue n° 1, la boue n° 3 dégageait des odeurs nauséabondes.

Influence de la pression appliquée ΔP .

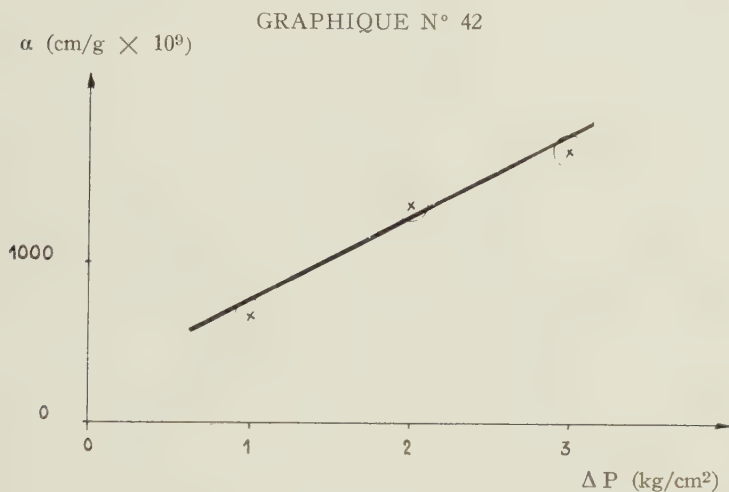
Nous avons effectué trois essais de filtration de la boue n° 1, floculée par le polyélectrolyte cationique C₃, sur la même toile métallique que précédemment, aux pressions $\Delta P = 1, 2$ et 3 kg/cm^2 . Ces essais nous ont permis de déterminer dans chaque cas les résistances spécifiques du gâteau:

$\Delta P = 1 \text{ kg/cm}^2$	$\alpha = 669 \cdot 10^9 \text{ cm/g}$
$\Delta P = 2 \text{ kg/cm}^2$	$\alpha = 1366 \cdot 10^9 \text{ cm/g}$
$\Delta P = 3 \text{ kg/cm}^2$	$\alpha = 1703 \cdot 10^9 \text{ cm/g}$

En traçant la courbe $\alpha = f(\Delta P)$ (graphique n° 42), nous obtenons trois points sensiblement alignés. Il en résulte que le coefficient de compressibilité n de la boue est égal à 1.

Si l'on augmente ΔP , α augmente de manière telle que la vitesse de filtration reste constante. Cela est dû à la forte compressibilité de ces boues, qui contiennent, ainsi que nous l'avons vu, beaucoup de matières organiques sous

forme floconneuse. La filtration de ces boues sous une pression supérieure à 1 kg/cm^2 est donc à proscrire.



Conclusion.

Les traitements de floculation préalables à la filtration des boues résiduaires diminuent, d'une manière plus ou moins notable suivant le type de boue, la résistance spécifique à la filtration, augmentant ainsi le débit d'un filtre donné. Souvent, les gâteaux formés sont très compressibles, et il sera intéressant d'effectuer une filtration sous vide pouvant se faire en continu.

CHAPITRE VII

APPLICATION DES TRAITEMENTS DE FLOCCULATION A LA FILTRATION SOUS VIDE DES BOUES RESIDUAIRES

Nous venons de voir que l'on a souvent intérêt à effectuer la filtration des boues sous basse pression, en particulier dans le cas des boues floculées très compressibles; c'est pourquoi nous avons complété les mesures précédentes par des essais de filtration sous vide.

Ces essais ont été effectués sur un buchner dont la paroi était garnie d'une toile filtrante en nylon. Nous avons appliqué le vide pendant des durées égales aux durées de filtration effectives sur un filtre rotatif à tambour (2,30 mn au maximum), puis nous avons effectué un séchage sous vide pendant une durée égale au double de la durée de filtration.

Cette méthode permet de déterminer l'ordre de grandeur des rendements et des caractéristiques du gâteau et du filtrat qu'on est en droit d'attendre d'un filtre industriel rotatif. Toutefois, il ne faut pas accorder un caractère absolu aux résultats trouvés. Leur intérêt réside dans les comparaisons qu'on peut faire entre eux, le but de cette étude étant de préparer des essais ultérieurs avec un filtre rotatif pilote.

1. — Filtration sous vide de la boue de lavoir à charbon

A. — FILTRATION DE LA BOUE BRUTE

Nous avons effectué ces essais sur de la boue non traitée contenant 8,5 g/l de matières sèches, puis sur de la boue épaissie par décantation contenant 133 g/l de matières sèches, en utilisant successivement des toiles nylon d'ouvertures 50, 76 et 104 microns.

La durée de filtration était de 2 min. 30, et celle de séchage, de 5 minutes. Dans tous les cas, les gâteaux obtenus avaient une épaisseur inférieure à 2 mm. Ils seraient difficiles à enlever du tambour d'un filtre industriel.

Dans le cas de la boue non épaissie, le filtrat contient environ 5 g/l de matières en suspension, et pour la boue épaissie, il en contient de 30 à 70 g/l. Les rendements ou efficacités, que l'on définit comme étant les pourcentages pondéraux de matière sèche retenue par le filtre, sont donc faibles: de 15 à 40 % pour la boue non épaissie, et de 45 à 76 % pour la boue épaissie. La production en solide sec, calculée en kg/m²/heure (compte tenu de la durée de séchage), varie de 1 à 2 dans le premier cas, et de 4 à 5 dans le deuxième. Ces résultats sont donc décevants à tous les points de vue: épaisseur du gâteau, rendement, qualité du filtrat, débit traité.

B. — FILTRATION DE LA BOUE FLOCLÉE PAR LE POLYÉLECTROLYTE A₂

a) *Boue brute (8,5 g/l de M.S.) + 10 mg/l de A₂.*

L'épaisseur du gâteau formé est encore inférieure à 2 mm. Par contre, la teneur en matières en suspension du filtrat varie entre 0 et 0,8 g/l, ce qui correspond à un rendement compris entre 83 et 100 %. La production de solide sec est de l'ordre de 3 kg/m²/h.

b) *Boue épaissie (133 g/l de M.S.) + 50 mg/l de A₂.*

L'épaisseur du gâteau formé varie de 4 à 6 mm, le filtrat obtenu est parfaitement limpide, la production de so-

lide sec atteint $24 \text{ kg/m}^2/\text{h}$. Le débit traité est de 10 fois plus grand que dans le cas de la même boue non floculée.

Ces quelques résultats nous montrent qu'un traitement de floculation préalable de la boue conduit à une meilleure filtration, à tous points de vue.

C. — FILTRATION DE LA BOUE FLOCULÉE PAR LE POLYMÈRE NON IONIQUE N_4

a) *Boue brute* + 10 mg/l de N_4 :

L'épaisseur du gâteau obtenu est inférieure à 2 mm. La teneur en matières en suspension du filtrat varie entre 0,2 et 1,3 g/l suivant les ouvertures des toiles filtrantes utilisées, ce qui correspond à un rendement compris entre 77 et 97 %. La production de solide sec varie de 2,3 à $4 \text{ kg/m}^2/\text{h}$.

b) *Boue épaissie* + 70 mg/l de N_4 :

L'épaisseur du gâteau est comprise entre 3 et 4 mm. Le filtrat est parfaitement limpide (rendement = 100 %), et la production en solide sec varie entre 12 et $21 \text{ kg/m}^2/\text{h}$.

D. — FILTRATION DE LA BOUE FLOCULÉE PAR LE POLYÉLECTROLYTE C_3

a) *Boue brute* + 10 mg/l de C_3 :

L'épaisseur du gâteau obtenu est inférieure à 2 mm, la teneur en matières en suspension du filtrat est comprise entre 2,4 et 5,3 g/l (rendement compris entre 35,3 et 65,7 %). La production de solide sec est comprise entre 2,02 et $3,15 \text{ kg/m}^2/\text{h}$.

b) *Boue épaissie* + 250 mg/l de C_3 :

L'épaisseur du gâteau est comprise entre 2 et 4 mm.

Le filtrat obtenu est limpide, et la production de solide sec se situe entre 10,5 et 16,4 kg/m²/h.

Dans tous les cas, les doses de floculant utilisées étaient les doses minima jugées nécessaires pour obtenir une bonne floculation.

L'ensemble des résultats précédents nous montre que :
il est nécessaire de partie d'une boue préalablement épaissie pour obtenir un gâteau ayant une épaisseur acceptable (supérieure à 2 mm),

les traitements de floculation de la boue permettent d'obtenir un gâteau épais, un filtrat parfaitement limpide, et une production de solide sec environ cinq fois plus grande pour une même surface filtrante,

les différents types de floculants ont une efficacité qui varie dans le même sens que pour la décantation ; donc, pour la filtration sous vide, l'efficacité est d'autant plus grande que les flocons sont gros.

Il en résulte que le traitement le plus efficace sera constitué par une floculation de la boue brute, suivie d'une décantation, la boue ainsi obtenue étant ensuite filtrée sur un filtre rotatif sous vide, en prenant la précaution de ne pas briser les flocons formés.

II. — Filtration sous vide de la boue d'eaux de lavage de gaz de hauts-fourneaux (n° 1)

Nous avons effectué ces essais sur une boue épaissie par décantation, contenant 40 g/l de matières en suspension, en utilisant comme paroi filtrante une toile de nylon d'ouverture 104 microns. Les boues filtrées ont subi différents traitements de floculation.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

	Conditionnement de la boue			
	Boue brute	Boue + A ₂	Boue + N ₄	Boue + C ₃
	—	—	—	—
Epaisseur du gâteau E (mm)	moins de 2	2	3	moins de 2
Humidité du gâteau H (%)	54	59	53	49
Matières en suspension du filtrat (g/l) .	30,40	1,64	2,03	28,30
Production de solide sec P (kg/m ² /h) ..	2,675	6,080	8,837	4,341
Rendement de la filtration R (%)	26,72	93,80	92,96	26,50
Volume de la boue traité (m ³ /m ² /h) ..	0,241	0,244	0,329	0,426

Ce sont donc ici les flocculants de types non ioniques et anioniques qui donnent les meilleurs résultats à tous les points de vue. Les quantités de matières en suspension du filtrat sont d'autant plus faibles que les flocons formés sont volumineux.

III. — Filtration sous vide de boues digérées de stations d'épuration

Nous avons filtré, sur une toile nylon d'ouverture 104 microns, trois types de boues digérées :

Boue n° 1: provenant d'une station d'épuration à lit bactérien, contenant 74,5 g/l de matières sèches.

Boue n° 2: provenant d'une station d'épuration à boues activées, contenant 124,7 g/l de matières sèches.

Boue n° 3: provenant d'une station à boues activées, contenant 113,8 g/l de matières sèches.

Pour ces trois boues, nous avons pris des durées de filtration de 2 min. 30, et des durées de séchage de 5 minutes.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans les trois tableaux suivants.

a) Boue n° 1

	Conditionnement de la boue				
	Brute	+ 500 mg/l A ₉	+ 500 mg/l N ₄	+ 500 mg/ C ₂	+ 80 % de cendres
	—	—	—	—	—
Epaisseur du gâteau, E (mm)	1	1	2	4	2
Humidité du gâteau, H (%)	90,9	90,2	88,5	86,5	78,1
Teneur en M. S. du filtrat (g/l)	5,33	4,50	0,82	0,52	4,00
Production de solide sec, P (kg/m ² /h)	1,060	0,868	2,984	7,576	4,056
Volume de boue traité, V (m ³ /m ² /h)	0,014	0,012	0,040	0,102	0,025

b) Boue n° 2

	Conditionnement de la boue				+ 80 % cendres
	Boue brute	Boue + A ₉	Boue + N ₄	Boue + C ₂	
	—	—	—	—	—
Epaisseur du gâteau, E (mm)	2,5	2	2,5	6	3
Humidité du gâteau, H (%)	71,6	77,8	74,9	71,3	54,7
Teneur en M. S. du filtrat (g/l)	1,54	1,92	1,53	0,87	2,14
Production de solide sec, P (kg/m ² /h)	3,656	3,036	4,588	14, 624	16,620
Volume de boue traité, V (m ³ /m ² /h)	0,027	0,022	0,033	0,107	0,065

c) Boue n° 3

	Conditionnement de la boue				+ 80 % cendres
	Boue brute	Boue + A ₂	Boue + N ₄	Boue + C _R	
Epaisseur du gâteau, E (mm)	1,5	1	4	3	2
Humidité du gâteau, H (%)	83,6	87,1	82,9	80,7	72,9
Teneur en M. S. du filtrat (g/l)	3,29	5,40	5,77	3,53	5,37
Production de solide sec, P (kg/m ² /h)	2,10	1,44	5,66	4,85	6,84
Volume de boue traité, V (m ³ /m ² /h)	0,017	0,011	0,045	0,039	0,031

Dans presque tous les cas, c'est la boue floculée par le polyélectrolyte C₃ qui se prête le mieux à la filtration sous vide, donnant un gâteau d'épaisseur maximum, d'humidité minimum, un filtrat contenant le moins de matières en suspension, et une production de solide sec 5 à 7 fois plus grande que pour la même boue non floculée. La production de solide sec est plus faible pour la boue traitée par un polyélectrolyte anionique que pour la boue non traitée.

Comme dans le cas de la filtration sous pression, nous remarquons une grande différence de comportement entre les boues n° 2 et 3. Dans le cas de la boue n° 3, qui est mal digérée, on obtient un filtrat contenant beaucoup de matières en suspension, une production de solide sec faible, et un gâteau très humide. Il convient donc d'insister sur le rôle d'une bonne digestion des matières organiques dans tous les traitements ultérieurs de déshydratation des boues de stations d'épuration.

Conclusion.

Tous les résultats précédents nous montrent que pratiquement dans tous les cas, une floculation de la boue, ef-

fectuée en utilisant un polymère organique *choisi convenablement*, améliore dans de très grandes proportions les performances d'un filtre fonctionnant sous vide, ainsi que les caractéristiques du filtrat et du gâteau obtenus.

CONCLUSION

Au cours du présent travail, nous avons caractérisé les quatre types de boues étudiées, en mettant en évidence leurs propriétés physiques et chimiques. Nous avons plus spécialement étudié les propriétés électriques des particules en suspension qui sont un paramètre important des essais de floculation, en utilisant une technique de micro-électrophorèse. En plus de leur intérêt purement descriptif, les courbes de répartition du potentiel zêta nous ont permis de définir un critère d'homogénéité des suspensions du point de vue des propriétés électriques des particules les constituant.

L'étude de l'action des polymères et polyélectrolytes organiques sur le potentiel zêta des particules et l'interprétation des courbes ainsi obtenues nous ont montré que cette action était différente suivant le type de flocculant utilisé: non ionique, anionique ou cationique. D'une façon générale, l'allure des courbes obtenues est caractéristique du type de produit utilisé.

Nous avons constaté que, dans le cas des polyélectrolytes cationiques, les doses nécessaires pour annuler le potentiel zêta des particules de la boue et les doses nécessaires pour provoquer une floculation, sont du même ordre de grandeur si l'on rapporte ces doses à la teneur en matières sèches de la boue, ce qui prouve que ces produits provoquent la floculation essentiellement par neutralisation des charges électriques portées par les particules. Le contrôle du potentiel zêta se révèle donc comme étant une méthode satisfaisante pour l'étude de la floculation par

les polyélectrolytes cationiques. Il n'en est pas de même dans le cas des polymères non ioniques et des polyélectrolytes anioniques dont l'action fait surtout intervenir des phénomènes d'adsorption.

Une étude de la décantation de la boue de lavoir à charbon nous a permis de vérifier l'hypothèse suivant laquelle la vitesse de chute des particules est uniquement fonction de la concentration locale, et nous avons exploité cette fonction dans ce cas particulier, vérifiant ainsi à posteriori la théorie de KYNCH. Les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer quantitativement l'efficacité des flocculants pour ce type de boue. Dans le cas le plus favorable, un polyélectrolyte anionique multiplie la vitesse de décantation par 185.

Des essais en installation pilote nous ont permis de déterminer les grandeurs que ne peuvent prévoir les théories de la centrifugation : rendements, caractéristiques du sédiment et du centrifugat en fonction des conditions d'exploitation de la centrifugeuse. Il apparaît que la concentration en matières solides des boues centrifugées est un paramètre important. Une floculation préalable des boues n'améliore que peu les performances de la centrifugeuse ou très souvent les diminue, la centrifugation apparaissant comme un moyen de traitement trop brutal des flocons fragiles. Dans le cas des boues digérées de stations d'épuration, la forte teneur en matières solides du centrifugat présente un grave inconvénient.

Les essais de filtration sous pression que nous avons entrepris nous ont conduit aux conclusions suivantes :

Au-delà d'une période initiale relativement courte, c'est le gâteau qui joue le rôle de milieu filtrant, et sa résistance spécifique, liée à sa structure, impose la vitesse de filtration. Par suite de sa compressibilité, la résistance spécifique du gâteau augmente toujours avec la pression utilisée. Ces résultats confirment les observations effectuées par de nombreux auteurs que nous avons cités.

Dans le cas des boues de lavoir à charbon, seul un polymère non ionique améliore nettement la filtration. Le coefficient de compressibilité de ces boues floculées est voisin de 1.

Dans le cas de l'une des boues de lavage de gaz de hauts-fourneaux, tous les floculants utilisés ont diminué la résistance spécifique à la filtration dans des proportions importantes. Dans le cas du polyélectrolyte cationique le plus efficace, la résistance spécifique à la filtration est 18 fois plus faible que dans le cas de la boue floculée. Pour l'autre boue, elle est environ diminuée de moitié.

Dans le cas des boues digérées de stations d'épuration, la résistance spécifique à la filtration est de 6 à 23 fois plus faible pour la boue floculée par un polyélectrolyte cationique que pour la même boue non conditionnée.

Les essais de filtration sous vide destinés à compléter les essais précédents nous ont permis d'évaluer les rendements et les caractéristiques du gâteau et du filtrat que l'on peut attendre d'un filtre industriel rotatif sous vide.

Dans tous les cas, il a été nécessaire de floculer préalablement la boue pour obtenir un gâteau d'épaisseur convenable. Ces résultats confirment donc l'intérêt des polymères et polyélectrolytes organiques dans les traitements de filtration.

L'ensemble de nos travaux nous permet donc de déterminer les procédés de déshydratation des boues résiduaire qui nous paraissent être techniquement les plus intéressants. Les traitements de filtration et de centrifugation qui sont les seuls à donner un produit manutentionnable nécessitent au départ l'utilisation d'une boue épaissie, obtenue par décantation des eaux contenant des matières en suspension.

Une floculation préalable permettra d'améliorer beaucoup la vitesse de décantation, diminuant d'autant le temps de rétention et la taille des installations nécessaires. Le

choix du flocculant organique à utiliser devra être effectué soigneusement, autant que possible suivant les critères que nous avons définis.

La seconde partie du traitement consistera, soit en une centrifugation avec retour du centrifugat au bassin de décantation (boues de lavage de gaz de hauts-fourneaux), soit en une filtration des boues non flocculées (boues de lavoir à charbon) ou des boues flocculées (boues digérées de station d'épuration d'eaux urbaines) sur un filtre rotatif sous vide, le filtrat pouvant être évacué directement, étant donné sa faible teneur en matières solides.

Nous espérons ainsi avoir contribué par ce travail à la connaissance des phénomènes de base des traitements de floculation et à leur application à la déshydratation des boues résiduaires, en mettant en évidence l'intérêt particulier que présente l'utilisation des polymères et polyélectrolytes organiques qui, en détruisant la structure colloïdale des boues, facilitent leur déshydratation ultérieure.

BIBLIOGRAPHIE

I. *Ouvrages Généraux:*

- H.R. KRUYT. — Colloïdal Science. Elsevier Amsterdam (1952).
P. PASCAL. — Chimie Générale, T. IV. Masson et Cie (1952).
E. DARMOIS et G. DARMOIS. — Electrochimie Théorique. Masson et Cie (1960).
R. AUDUBERT. — Principes de l'électrophorèse. P.U.F. (1957).
(10) BRINTON et LAUFER. — Electrophoresis. Academic Press Inc. New York (1959).
R. GIBERT. — Génie chimique. T. I, Eyrolles (1960).

II. *Articles concernant le potentiel zêta et les phénomènes de floculation:*

- (1) VON SMOLUCHOWSKI. — *Physik Z.*, 17, 557 (1916).
— *Z. Physik Chem.*, 92, 129 (1918)
— *Koll Z.*, 21, 98 (1917).
(2) LINDER and PICTON. — *J. Chem. Soc. (Londres)*, 61, 148 (1892).
(3) VON HELMHOLTZ. — *Ann. Physik. Wiedemann*, 1879, 7, 337.
J. PERRIN. — *J. Chim. Physique*, 1904, 2, 607.
(4) G. GOUY. — *J. Phys.*, 1910, 9 (4), 457.
— *Ann. Phys.*, 1917, 7 (9), 129.
(5) D. CHAPMANN. — *Phil. Mag.*, 1913, 25 (6), 475.
(6) O. STERN. — *Z. Electrochem.*, 1924, 30, 508.
(7) GRAHAME. — *Chem. Rev.*, 1947, 41, 441.
(8) SCHULZE. — *J. Prakt Chem.*, 25 (2), 431, 1822.
(9) HARDY. — *Proc. Roy. Soc. (Londres)*, 66, 110, 1900.
DEBYE et HUCKEL. — *Physik Z.*, 24, 185, 1923.
D.C. HENRY. — *Proc. Roy. Soc. (Londres)*, 133, 106, 1931.
— *Trans. Faraday Soc.*, 44, 1021, 1948.
VERWEY et OVERBEEK. — « Theory of the stability of lyophobic colloids ». Elsevier (1948).
A. MICHAELS. — « Agrégation des suspensions par les polyélectrolytes ». *Ind. and Eng. Chem.*, vol. 46, n° 7, p. 1485-1490 (1954).
A. KATCHALSKI. — « Polyelectrolytes ». *Endeavour*, 12, 90 (1953).
C. JOHNSON. — « Polyelectrolytes as coagulants and coagulation aids ». *Ind. and Eng. Chem.*, p. 1080-1083, juin 1956.
T.M. RIDDICK. — Chemical Engineering, 26 juin et 10 juillet 1961.
— *Journal American Water Works Association (J.A.W.W.A.)*, août 1961.

- BLACK. ... *Journal American Water Works Association*, novembre 1958, décembre 1959, avril 1960, juin 1961.
- MICHAELS and BOLGER. — « The plastic flow behaviour of flocculated kaolin suspensions ». *Ind. and Eng. Chem. Fundamentals*, 1, p. 153-162, août 1962.
- MATHESON and Mac KENZIE. — « Flocculation and thickening coal washery refuse pulps ». *Coal Age U.S.A.*, 1962, 12, p. 94-100.
- E. HUDSON. — « Les aspects de la floculation ». *J.A.W.W.A.*, 57, n° 7, p. 885-892 (1965).
- SENNETT and OLIVIER. — « Colloïdal dispersions, electrokinetic effects and the concepts of zêta potential ». *Ind. and Eng. Chem.*, vol. 57, n° 8, p. 32-50 (1965).
- ROWLAND, BULAS, ROTHSTEIN, EIRICH. — « Structure des macromolécules aux interfaces liquide-solide ». *Ind. and Eng. Chem.*, vol. 57, n° 9 (1965).

III. Articles concernant la décantation:

- (11) COE and CLEVENGER. — *Trans Am. Inst. Mining? Engrs*, 55, 356 (1916).
- (12) ROBINSON. — *Ind. and Eng. Chem.*, 18, 869 (1926).
- (13) VAND V. — *J. Phys. Coll. Chem.*, 52, 277 (1948).
- (14) STEINHOOR H.H. — *Ind. Eng. Chem.*, 36, 618, 840, 901 (1944).
HAWSKLEY. — *Inst. of Phyl. Symp.*, 114 (1950).
EGLOF and Mac CABE. — *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 33, 620 (1937).
WORK and KOHLER. — *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 33, 620 (1941).
ROBERTS E.J. — *Mining Eng.*, 1, 61 (1949).
- (15) KYNCH G.J. — « A theory of sedimentation ». *Trans. Faraday Soc.*, 48, 166 (1952).
- (16) TALMAGE and FITCH. — *Ind. and Eng. Chem.*, 47, 38, 41 (1953).
- (17) HASSET. — *Ind. Chem.*, 34, 116, 489 (1958).
- (18) SHANNON, de HAAS, STROUPE, TORY. — *Ind. and Eng. Chem. Fund.*, 2, 203 (1963); 3, 250 (1964).
- (19) EDELINE « Sédimentation d'une dispersion, théorie de Kynch. Commentaires et essais ». *Bulletin du Cebedau*, n° 45, p. 959-III, p. 142-149.
- DANZE J. — « Théorie de l'appareillage des industries chimiques, T. II (1957).
Cours professé à l'Université de Liège.
- CREMER and DAVIES. — *Chem. Eng. Pract.*, 3, 248 (1957).
- COMING, PRUISS, DEBORD. — *Ind. Eng. Chem.*, 46, 1164 (1954).
- DE VILLIERS J.S. — *Inst. Min. and Metall.*, 61, 501 (1961).
- CROSS (H.). — « A new approach to the design and operation of thickeners ». *J. Afr. Inst. Ming. Metal.*, 1963, 7, p. 271-298.
- ROBINS. — « The theory of the design and operation of settling tanks ». *Trans. Inst. Chem. Engrs. G.B.*, 1964, 4, p. 158-163.
- SHANNON et TORY. — « Settling of Slurries ». *Ind. and Eng. Chem.*, vol. 57, pp. 18-25 (février 1965).
- MICHAELS et BOLGER. — « Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions ». *Ind. and Eng. Chem. Fundamentals*, 1, pp. 24-32 (1962).

BEHN et LIEBMAN. — Analysis of thickener operation ». *Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.*, 1963, 3, p. 1-15.

IV. *Articles concernant la centrifugation:*

- SOLOV. — « New development in centrifuge applications ». *Chem. Eng. Prog.*, 44, 105 (1948).
- DOLTON. — *Proc. Chem. Eng. Gp.*, 33, 1 (1951).
- TRAWINSKI. — « Zentrifugen ». *Chem. Ing. Tech.*, 1954 (4), 189-204; 1959 (10), 661-666.
- SULLIVAN. — *Chem. Eng. Prog.*, 1956, 52-83; 1959, 55-96.
- (20) AMBLER C.M. — *Chem. Eng. Prog.*, 1948, 44, 105.
— *Chem. Eng. Prog.*, 1952, 48, 150
— *Chem. Week*, 1958, 10, 87.
— *Ind. and Eng. Chem.*, 1961, 53, 430.
- FLOOD. — « Centrifugals ». *Chem. Eng.*, 1958, 62, 217.
- SMITH. — « Centrifuges ». *Chem. Ind.*, 1949, 65, 357.
- (21) FRAMPTON. — « Evaluating the performance of industrial centrifuges ». *Chem. and Proc. Eng.*, août 1963.

V. *Articles concernant la filtration:*

- KOZENY. — *J. Sitz. Ber. Akad. Wiss. Wien, Math. Nat. Kl.*, 1927, 136, 271.
- MILLER S.A. — *Chem. Eng. Prog.*, 1951, 47, 497.
- (22) RUTH B.F. — *Ind. Eng. Chem.*, 1935, 27, 705; 1946, 38, 564.
- (23) CARMAN P.C. — *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1937, 15, 150; 1938, 16, 168.
— *J. Soc. Chem. Ind.*, 1933, 52, 280; 1938, 57, 225; 1939, 58, 1.
— *Faraday Soc. Disc.*, 1948, n° 3, 72.
- (24) SPERRY D.R. — *Ind. Eng. Chem.*, 1944, 36, 323.
TILLER F.M. — *Chem. Eng. Prog.*, 1953, 49, 467.
GRACE H.P. — *Chem. Eng. Prog.*, 1953, 49, 303; 1953, 49, 367.
- (25) LEWIS W.K. — *Chem. Met. Eng.*, 1922, 27, 594.
RIETMA. — *Chem. Eng. Sci.*, 1953, 2, 86.
COACKLEY. — *Sev. and Ind. Wastes*, 1956, 28, 963.
- ORLICEK A. — « Les principes physiques de la filtration ». *Génie Chimique*, septembre 1956.
- JACQMAIN D. — *Génie Chimique*, juin 1961.
- LE LEC. — « Variation de perméabilité des gâteaux de filtration ». *Génie Chimique*, septembre 1956.
- MATHESON et MacKENZIE. — « Filtration of flocculated coal concentrates containing clays ». *Trans. Soc. Min. Eng., U.S.A.*, 1962, 223, pp. 162-172.
- BERLINE et HEITZ. — « Filtration des liquides ».
I. Théorie de la filtration. *Génie Chimique*, février 1963.
II. Choix du filtre. *Génie Chimique*, juin 1963.
- FERN K. — « Flocculants in filtration ». *Filtration*, pp. 327-28, novembre-décembre 1964.
- NIEMITZ et FUSS. — « Résistance spécifique à la filtration et compressibilité des boues de clarificateurs ». *Gas- und Wasserfach*, vol. 106, n° 28, pp. 778-783 (1965).
-



TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. — Détermination des caractéristiques physiques et chimiques des boues étudiées	5
CHAPITRE II. — Phénomènes de floculation et potentiel élec- trocinétique	21
CHAPITRE III. — Etude de l'action des polymères organiques sur le potentiel zêta des particules en suspension	27
CHAPITRE IV. — Application des traitements de floculation à la décantation des boues résiduaires	65
CHAPITRE V. — Application des traitements de floculation à la centrifugation des boues résiduaires	79
CHAPITRE VI. — Application des traitements de floculation à la filtration sous pression des boues résiduaires	99
CHAPITRE VII. — Application des traitements de floculation à la filtration sous vide des boues résiduaires	123
CONCLUSION	131
BIBLIOGRAPHIE	135



VU ET APPROUVÉ :

Nancy, le 9 juillet 1966.

Le Doyen,

J. AUBRY.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Nancy, le 11 juillet 1966.

Le Recteur,

Président du Conseil de l'Université,

P. IMBS.

Imprimerie Georges Thomas - Nancy - Dépôt légal III-1966 - N° 711

